PLANEACIÓN Y CONTROL DE LA PRODUCCIÓN



DANIEL SIPPER • ROBERT L. BULFIN, Jr.

PLANEACION Y CONTROL DE LA PRODUCCIÓN

Planeación y control de la producción

Daniel Sippper
Departamento de ingeniería industrial
Tel Aviv University

Robert L. Bulfin, Jr.
Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas
Auburn University

Traducción: ***M en C Murcia González Osuna***
Departamento de Ingeniería Industrial
Facultad de Ingeniería, UNAM

Revisión técnica:
Ing. Silvina Hernández García
Departamento de Ingeniería Industrial
Facultad de Ingeniería, UNAM

McGRAW-HILL

MÉXICO • BUENOS AIRES • CARACAS • GUATEMALA • LISBOA • MADRID
NUEVA YORK • SAN JUAN • SANTA FE DE BOGOTÁ • SANTIAGO • SAO PAULO
AUCKLAND • LONDRES • MILÁN • MONTREAL • NUEVA DELHI • SAN FRANCISCO
SINGAPUR • ST. LOUIS • SIDNEY • TORONTO

Gerente de marca: Carlos Granados Islas
Supervisara de edición: Leticia Medina Vigil
Supervisor de producción: Zeferino García García

PLANEACIÓN Y CONTROL DE LA PRODUCCIÓN

Cedro Núm. 512, Col. Atlampa
Delegación Cuauhtémoc
06450 México, D.F.
Miembro de la Cámara Nacional de Industria Editorial Mexicana, Reg. Núm. 736

ISBN 970-10-1944-X

Translated from the first edition in English of
PRODUCTION: PLANNING, CONTROL AND INTEGRATION

ISBN 0-07-057682-3

1234567890 9076543218

Impreso en México Printed in México

Esta obra se terminó de imprimir
en Julio de 1998 en
Impresora Publl-Mex S.A. de C.V.
Calz. San Lorenzo 279-32
Delegación Iztapalapa
C.P. 09850 México D.F.

Se tiraron 5,000 ejemplares



Sobre los autores

Daniel Sipper es profesor en el departamento de ingeniería industrial de Tel Aviv University. Cursó la licenciatura en Tachnion Israel Institute of Technology, la maestría en Columbia University y el doctorado en ingeniería industrial en Georgia Institute of Technology.

Antes de obtener su doctorado, el Dr. Sipper pasó 11 años en la industria, tanto en Israel como en Estados Unidos. Trabajó en diferentes aspectos de los sistemas industriales, con puesto en varias organizaciones y a diferentes niveles —ingeniero de investigación, gerente de producción y administrador de proyectos—. Entre los temas que analizó se encuentran manufactura, control de producción, investigación y desarrollo, control de proyectos y planeación estratégica—en diferentes industrias: de transformación, metal-mecánicas y de la defensa—.

Después de terminar el doctorado, el Dr. Sipper se quedó como profesor en Georgia Tech. En 1972 se unió a Tel Aviv University en Israel y estableció el programa de ingeniería industrial, primero como licenciatura y en 1980 lo convirtió en un departamento independiente que otorga los tres diplomas. A través de los años, el Dr. Sipper ha tomado parte en comités de numerosas universidades importantes y en comités nacionales. Pertenece a HE, INFORMS y ASME como "sénior member" y forma parte también del comité editorial del *International Journal of Production Research.* El Dr. Sipper es presidente del Comité Científico de ICTAF (Interdisciplinary Center for Technological Analysis and Forecasting, en Tel Aviv University.

Robert L. Bulfín, Jr. realizó su licenciatura en ingeniería en Georgia Institute of Technology. Al graduarse, aceptó un puesto en Celanese Fibers Company como ingeniero industrial. Ahí se involucró en todas las etapas de la ingeniería industrial: diseño del trabajo, estándares y métodos, control de calidad, optimización de procesos, distribución de planta, flujo de materiales y control de inventarios.

Después de dejar Celanese, Bob regresó a Georgia Tech y obtuvo la maestría y el doctorado en ingeniería industrial y de sistemas. Al terminar el doctorado aceptó ir como profesor de ingeniería industrial y de sistemas en la University of Arizona. Ahí estuvo a cargo de la enseñanza de cursos a nivel licenciatura y de graduados de ingeniería industrial y de investigación

de operaciones. Dejó Arizona al aceptar un puesto de profesor en Auburn University, donde a la fecha es profesor de ingeniería industrial.

Los intereses docentes y de investigación del Dr. Bulfin se centran en la planeación y control de la producción e investigación de operaciones. Ha trabajado en numerosas industrias privadas, que incluyen los sectores de minas, electrónica, agricultura, ingeniería espacial, plásticos, textiles y conformado de metales. Su investigación está dedicada primordialmente a la planeación y control de la producción; ha apoyado a NASA, DoD, USAID y varias compañías privadas.

Contenido

Prefacio

Este prefacio describe la filosofía, el enfoque y el contenido de *Planeación y control de la producción.* Este libro analiza los sistemas de producción, el esqueleto dinámico de la manufactura y el servicio modernos. Sin una planeación, control e integración inteligentes de los sistemas de producción, ningún negocio será competitivo en el mercado global actual.

Escribimos este libro por dos razones. Primero, el entorno de producción se encuentra en cambio continuo. Segundo, la respuesta de la comunidad académica es el cambio de planes de estudio. Después de varios años de enseñanza y trabajo en los sistemas productivos, quisimos ser parte de este emocionante cambio.

Lo que el libro cubre refleja nuestra experiencia docente y el trabajo en los sistemas de producción, combinados con el estudio de los temarios en los programas de ingeniería y administración, y una evaluación de las necesidades futuras. Se cubren la evolución de los sistemas productivos, la solución de problemas, pronósticos, planeación agregada, inventarios, planeación de requerimientos de materiales, programación, administración de proyectos y planeación y control de la producción. Suponemos que el estudiante está familiarizado con la estadística básica y la investigación de operaciones. Más adelante se describirán con detalle los capítulos.

La mayor parte de los libros presentan el control de la producción como una colección de modelos y algoritmos. Sentimos que éstos son importantes y que el estudiante debe aprenderlos, pero es poco probable que algún modelo se ajuste con exactitud a las situaciones que se encuentren después de graduarse. Así, se hace hincapié en cómo resolver estos problemas. Esto significa el desarrollo de modelos, la comprensión de las suposiciones que los fundamentan, la identificación de las necesidades de datos y el conocimiento de cuándo y cómo usarlos.

Es sencillo desarrollar ciertas habilidades, todo lo que se necesita es que nos digan qué hacer y seguir la "receta". Aprender el algoritmo simplex es un ejemplo. Éstas son cosas que una computadora puede hacer muy bien. Otras habilidades, como convertirse en un buen analista de problemas, son más difíciles. Lograrlo es como aprender a montar en bicicleta —alguien puede decirnos cómo pero en realidad la única manera de aprender es haciéndolo—. En una situación ideal, este tipo de habilidades se aprenden como asistente o aprendiz, pero la mayoría de las compañías quieren que sus empleados sean productivos de inmediato. Para ayudar al es-

tudiante, hemos incluido un capítulo sobre solución de problemas. Muchos piensan que estas habilidades se desarrollan en cursos anteriores, no estamos de acuerdo. Nuestro enfoque controlado por el problema pone de manifiesto aún más la importancia del razonamiento.

El mejor término para describir nuestro enfoque es "controlado por el problema". Casi todos los capítulos comienzan con un ejemplo ilustrativo del entorno del problema, estableciendo el escenario para el tema bajo estudio. Cada capítulo cuenta con una variedad de ejemplos que muestran la técnica específica o el concepto que se estudia. Cuando es apropiado, el capítulo contiene un resumen y un breve panorama sobre la evolución del tema. Además, según es necesario, la presentación resalta los aspectos computacionales y se dedica una sección separada a la disponibilidad de software en el área específica.

El análisis incluye un tratamiento matemático riguroso cuando es pertinente. Sin embargo, el rigor aumenta en forma gradual. Por flexibilidad, cada sección termina con un conjunto de ejercicios de tarea. Nuestra filosofía de tareas se puede describir como un enfoque "cuádruple" ya que se incluyeron ejercicios de cuatro tipos: repeticiones, ejercicios, problemas y minicasos. Las repeticiones tienen una solución directa, los ejercicios requieren que el estudiante elija la técnica correcta, los problemas pueden tener varios enfoques correctos según las suposiciones que se hagan y los minicasos requieren que el estudiante reconozca la necesidad u oportunidad adecuadas. En algunos es necesario usar una computadora. El libro contiene cerca de 550 ejercicios, además de los minicasos. Las hojas de cálculo, STORM, QuickQuant y otros paquetes mitigan la carga computacional para el estudiante. Al final de cada capítulo aparece una lista de referencias para profundizar en el estudio.

Algunas características importantes de nuestro libro son únicas. Éstas se pueden resumir como sigue:

- Un capítulo de modelado y solución de problemas
- Un capítulo sobre integración
- Ejemplos ilustrativos al principio de la mayor parte de la secciones, seguidos de una pre sentación de las teorías y técnicas
- Un balance entre el conocimiento y la profundidad
  Rigor matemático, al nivel adecuado
- Un enfoque con exactitud teórica pero orientado a la aplicación acorde con los problemas y desarrollos actuales
  Un enfoque controlado por el problema más que por la herramienta
- Más de 100 ejemplos
- Uso de "cuadros" (presentaciones independientes) para resaltar la implantación y la prác tica de los conceptos

Este libro está orientado a los estudiantes de nivel alto de los programas de ingeniería industrial y administración de empresas que tienen un curso enfocado a la producción. Se puede usar en una secuencia de uno o dos trimestres o de uno o dos semestres, dependiendo del alcance y profundidad del curso. Tal vez contenga más material que el que se cubriría en un curso de licenciatura común. Esto permite al profesor elegir los temas. Este libro es más que un libro de texto, puede ser un recurso valioso para el **profesional.** Después de todo, el aprendizaje no termina cuando un estudiante se gradúa.

Cuando escribimos este libro tuvimos la flexibilidad en mente, tanto entre los capítulos como dentro de ellos. La secuencia de temas es la que nos pareció más lógica, sin embargo, otros profesores pueden dar una distinta. La flexibilidad intrínseca permite que cada instructor construya su propia secuencia sin tener dificultades. Los únicos capítulos que tienen una secuencia son el 6 y el 7.

La flexibilidad en términos del alcance se puede lograr cubriendo menos temas; en términos de profundidad se obtiene saltándose secciones dentro de los capítulos. Así, si se desea menos rigor matemático, es posible omitir los desarrollos matemáticos y considerar sólo los resultados.

El hecho de que los ejercicios aparezcan al final de cada sección facilita al profesor la asignación de tareas si se omitieron algunas. La dificultad de cada ejercicio (el enfoque "cuádruple") se puede juzgar en el *Manual del instructor*

Se presenta un breve resumen y se resaltan los aspectos únicos de cada capítulo del libro.

Comenzamos por describir el mundo como un sistema comercial abierto; la competencia en la globalización es un factor importante. Se identifican cuatro etapas en la evolución de los sistemas de producción: los sistemas antiguos, los sistemas feudales, la fábrica europea y los sistemas estadounidenses. Se analizan todos los aspectos de la administración científica como parte de los sistemas controlados por la producción. También se incluye la presentación del ciclo de vida de un producto, sistemas de baja y alta tecnología, y los tipos de organización usados y las decisiones que se toman en los sistemas de producción.

Este capítulo describe los sistemas controlados por el mercado, un enfoque único en los libros de sistemas de producción. Si partimos de la práctica administrativa actual, las teorías clásicas no cubren todos los aspectos del nuevo entorno. Aunque los conceptos futuros son inciertos, proporcionamos una lista de las teorías más importantes que pensamos serán aplicables. Estos

conceptos se integraron en la "rueda de la competitividad" cuyo centro es el cliente. Se presenta la transición de una cultura de eficiencia a una de efectividad. Se analiza con detalle la integración y se muestra cómo ha generado un nuevo entorno de manufactura de clase mundial y sus detonantes: producción ligera y manufactura ágil.

En general, los libros sobre sistemas de producción no incluyen un capítulo sobre solución de problemas; sentimos que era necesario incluirlo. Comienza con una descripción del enfoque de solución de problemas. Los pasos más importantes son la identificación y comprensión del problema. Una vez hecho esto, casi siempre se construye un modelo. La descripción de las fronteras del problema, los objetivos, las relaciones y las variables es parte de la construcción del modelo. Se identifican los datos necesarios y se elige una representación. El modelo se resuelve con el algoritmo correspondiente y su solución se interpreta considerando la situación real. Por último, se implanta la solución al problema real.

Este capítulo inicia con el análisis del sistema de pronósticos dentro del marco de solución de problemas. Muchos pronósticos en un sistema de producción se basan en la identificación del patrón del proceso en que se apoya, usando un modelo correcto para el proceso y un método de pronósticos adecuado. Se analizan varios tipos de métodos de pronósticos que incluyen métodos cualitativos, causales y de series de tiempo. Se hace una presentación breve de métodos de pronósticos no tradicionales, junto con sus referencias. Se presentan las formas de medir la exactitud del pronóstico, que se usa para mantener el control de estos sistemas. Se concluye con una sección dedicada a los pronósticos en la práctica.

La planeación agregada se enfoca a la planeación de la producción a mediano plazo. Se analizan cuatro factores que afectan las decisiones: capacidad, costos de producción, costos de cambio de capacidad y costos de inventarios. Se presentan dos enfoques de la planeación agregada: los métodos con hoja de cálculo y los métodos de optimización. Los métodos con hoja de cálculo pueden producir estrategias de cero inventario, de nivel de producción y mixtas. Los enfoques de optimización incluyen modelos de programación lineal y modelos de transporte. Aunque la mayoría de los libros no los incluyen, se presentan modelos más avanzados para productos y procesos múltiples.

En lugar de la clasificación normal de los sistemas de inventarios en determinísticos y estocasticos, los modelos se presentan desde el punto de vista de la toma de decisiones. El capítulo se divide en decisiones de cantidad, tiempo y control. Comenzando con los conceptos y políticas

de inventarios, se presentan más de 20 modelos, la mayoría con rigor matemático y aspectos de su implantación. Una sección separada analiza la relevancia de los modelos de inventarios en la era de la reducción de los mismos y de los métodos de producción j*usto a tiempo.* Se hace hincapié en el inventario como una política de servicio tanto cualitativa como conceptualmente. Los ejemplos resaltan los modelos. La sección sobre decisiones de control es una adición original al libro. Contiene un análisis matemático del principio de Pareto, seguido del estudio de diseño del sistema de control-inventario en un entorno de artículos múltiples. Cada sección termina con un resumen en una tabla.

Este capítulo examina sistemas de demanda independiente. Dentro de este marco, se analiza la capacidad, el programa maestro de producción y la planeación de requerimientos de materiales según su relación con los tres diferentes entornos de producto-mercado. También se cubren estructura del producto, explosión, implosión, ajuste a netos y compensación. Se presentan los métodos de tamaño del lote y sus extensiones a sistemas jerárquicos de artículos múltiples. Sigue el control de inventarios en varios niveles en los sistemas MRP. Se usa un ejemplo de un teléfono de botones para explicar los modelos. El control de planta y el MRP como sistema de información concluyen el capítulo.

Una vez definido el problema de programación básico, se presentan modelos de una sola máquina para varias medidas de desempeño. Siguen los modelos paralelos con resultados del peor caso y un heurístico basado en la lista. Se define la producción continua y se presentan algoritmos exactos para casos especiales y heurísticos para el modelo general. Por último se estudia la producción intermitente, la más difícil de programar. Se proporcionan heurísticos de despacho, en términos del análisis de varias reglas de prioridad. Los ejemplos aclaran los modelos y procedimientos y un cuadro sobre la implantación agrega un poco de sabor del mundo real.

Se analizan los aspectos organizacionales, administrativos y cuantitativos de los proyectos. Se dedica una sección a desarrollo de productos y se usa un ejemplo correspondiente a lo largo del capítulo para ilustrar los conceptos y metodologías. Se estudian las bases de planeación, programación y control de proyectos. Después se presenta un tratamiento cuantitativo de PERT, recursos limitados y trueques tiempo/costo. De nuevo se usa un cuadro para estudiar aspectos de aplicación real.

Pensamos que este capítulo es único tanto por su enfoque como por su estructura. Se centra en la integración como un enfoque global para la planeación y control de la producción. La integración describe tanto un concepto como una técnica. Primero se examinan aspectos relaciona-

dos con la integración: interacción de la función de producción con el resto de la organización, arquitectura del control e integración entre plantas. La planeación y control de la producción integrados es un concepto acorde con una filosofía y un conjunto de herramientas para implantarla. Se dan tres grandes enfoques para la integración de la planeación y el control. Éstos son los sistemas empujar (MRP II y ERP), los sistemas empujar (JIT) y los sistemas de cuello de botella (OPT y CONWIP). Se incluye un estudio detallado de cada enfoque; se usan modelos matemáticos y ejemplos cuando es apropiado. Concluimos el capítulo con una comparación de los tres enfoques.

Daniel Sipper
Robert L Bulfin, Jr.

Agradecimientos

Escribir un libro es un esfuerzo largo e intenso. Por fortuna contamos con la ayuda y consejo de muchas personas que nos animaron. No es posible nombrar a todos los que nos ayudaron, pero debemos agradecer públicamente a unas cuantas personas. Si omitimos a alguien sin querer, pedimos una disculpa anticipada.

Este libro comenzó cuando Dan estaba en su año sabático en Auburn University. Ed Unger, jefe del departamento de ingeniería industrial y de sistemas, nos proporcionó su aliento, ayuda y apoyo material durante todo nuestro trabajo. Sin su apoyo activo, no hubiéramos podido terminar el libro.

El personal académico y el administrativo de los departamentos de ingeniería industrial y de sistemas de Auburn y de Tel Aviv, al igual que el personal de Telrad Corporation, Israel, simpatizaron con nuestros problemas, compartieron nuestras alegrías y nos proporcionaron consejos y ánimo. En particular, damos las gracias a J. Black, Russ Meller, Chan Park y Chuck Sox.

Bob Inman de General Motors Research Labs y Ed Mykytka del Air Forcé Institute of Technology, también hicieron contribuciones significativas al libro. Peter Purdue, los académicos y administrativos del Naval Postgraduate School, John Jarvis y el personal de Georgia Tech proporcionaron apoyo a Bob durante su visita en el sabático.

Damos las gracias a nuestros estudiantes en Auburn University y en Tel Aviv University, quienes leyeron los primeros borradores, trabajaron en los ejercicios y proporcionaron sugerencias valiosas para mejorar el material. Cindi Perdue y Narayanan Venkatacha de Auburn University y Avis Sless de Tel Aviv University merecen una mención especial por el trabajo con el texto, las gráficas, los ejercicios de tarea y las soluciones.

Agradecemos a los muchos revisores que leyeron las distintas versiones del manuscrito. Ellos proporcionaron una excelente retroalimentación y mejoraron el resultado. Entre los revisores se cuentan Ronald G. Askin de U. of Arizona, Diane E. Baily de USC, Catherine M. Harmonosky de Penn State, Timothy Ireland de Oklahoma State U., Hau L. Lee de Stanford, Surya D. Liman de Texas Tech, Jayant Rajgopal de U. of Pittsburgh, Nanua Singh de Wayne State U., G. Don Taylor de U. of Arkansas y Wilbert Wilhelm de Texas A&M. Por supuesto, cualesquiera errores en el libro son sólo nuestra responsabilidad.

Eric Munson, editor ejecutivo de ingeniería en McGraw-Hill, fue nuestro editor. Nos proporcionó el ánimo necesario y nos ayudó a mantener la energía en los tiempos difíciles. También damos las gracias al personal de McGraw-Hill and Publication Services.

Por último, sin que su mérito sea menor, agradecemos a nuestras familias: Shosh, Moshe y Yuval, y Lynn, Ben y Matt. Sin su apoyo, inspiración y sacrificios, este libro jamás se habría publicado.

CAPÍTULO

1

El paradigma de la producción

Los sistemas de producción en la sociedad moderna son sobresalientes. Estos sistemas forman la base para construir y mejorar la fortaleza y la vitalidad económicas de un país. La tarea de desarrollar y operar los sistemas de producción crece en complejidad. Los cambios importantes en los productos, los procesos, las tecnologías de gestión, los conceptos y la cultura, dan como resultado retos y necesidades cada vez mayores. La información y las técnicas que aquí se presentan ayudan al logro de estos retos. Este capítulo identifica y resalta algunos aspectos críticos relacionados con los sistemas de producción. Se comenzará por una presentación de la producción global.

Inspirada en el Renacimiento en el siglo XVII y más tarde en el inicio de la primera revolución industrial inglesa, Europa fue el centro del poder económico en el siglo XIX; Estados Unidos, sin embargo, se convirtió en el núcleo de la segunda revolución industrial, dominando el desarrollo del siglo XX. En consecuencia, la teoría y las primeras técnicas de la administración fueron el producto del desarrollo occidental. Los conceptos de la línea de producción en una fábrica, la división del trabajo y la estructura administrativa funcional alcanzaron su madurez tanto en Europa como en América. El surgimiento del Asia sur oriental después de la Segunda Guerra Mundial con una fuerte orientación a la exportación, en particular de Japón como una potencia industrial, dio como resultado un sistema comercial abierto en el que ya no se puede ignorar la competencia internacional. El advenimiento de este mercado global es el tema de esta primera sección. Se presentará primero la evolución de los sistemas de producción, seguida de un estudio del nuevo ambiente competitivo.

Se presentan dos aspectos de la evolución de los sistemas de producción; su historia y las teorías administrativas que crearon.

Históricamente, han surgido cuatro tipos importantes de sistemas de producción: el antiguo, el feudal, el europeo y el americano.

Se pueden encontrar evidencias de los sistemas antiguos desde 5000 a.C. cuando los sacerdotes sumerios comenzaron a registrar inventarios, préstamos y transacciones de impuestos. Alrededor de 4000 a.C. los egipcios utilizaron conceptos básicos de administración como planeación, organización y control, a juzgar por sus grandes proyectos de construcción de pirámides y estructuras similares. Otros desarrollos antiguos incluyen la idea de un salario mínimo y la de responsabilidad administrativa según lo establece el Código de Hamurabi alrededor de 1800 a.C. En el siglo II a.C. los hebreos usaban el principio de excepción y elegían al trabajador según la tarea y designaban personal de apoyo dentro del sistema.

En el Lejano Oriente, alrededor de 1100 a.C, los chinos tenían un sistema de gobierno completamente desarrollado. Practicaban la especialización del trabajo y la planeación, organizando y controlando la producción. Un poco más tarde, en 350 a.C, los griegos adoptaron la especialización del trabajo y hacían que sus trabajadores usaran movimientos uniformes y trabajaran al mismo ritmo.

Durante la Edad Media surgió el **sistema feudal** en el que el emperador, rey o reina tenía poder total sobre el país. Otorgaban poder a los nobles sobre ciertas regiones a cambio de la lealtad al reino. Los nobles a su vez delegaban tierras y autoridad a señores de menor alcurnia y así sucesivamente, hasta los hombres libres y siervos. Los sistemas de producción que existían se describen mejor como domésticos. Casi siempre, los integrantes de una familia eran tanto los dueños como los trabajadores; esto siguió prevaleciendo hasta mediados del siglo XV.

El **sistema europeo** surgió durante el Renacimiento. Aun cuando la idea del Renacimiento es la del desarrollo cultural, pasaban muchas cosas, en especial en Italia, que afectarían la industrialización y los sistemas de producción. Durante los años 1300, ahí se practicaba el registro en libros de partida doble y la contabilidad de costos. Resulta de gran interés la historia del Arsenal de Venecia, una instalación compleja de ensamble de barcos (cuadro 1-1).

CUADRO 1-1

EL ARSENAL DE VENECIA

Al prosperar Venecia, tuvo necesidad de una fuerte protección naval tanto para la ciudad como para su flota comercial. En un principio la ciudad comisionó buques de guerra de construcción privada y en emergencias reclutaba embarcaciones comerciales. Sin embargo, para 1436 tenía en operación un astillero llamado el Arsenal. Este sistema de producción fue el más grande y más complejo en su momento y se puede considerar como tal aun bajo los estándares actuales. El Arsenal tenía 2000 trabajadores y más de 60 acres de tierra y agua. Construía embarcaciones, armas y equipo, y resurtía los buques existentes. Almacenaba todas las refacciones y suministros navales, y las instalaciones estaban localizadas en un canal. La cubierta de un buque se trasladaba por el canal, a lo largo del cual los trabajadores de los talleres individuales instalaban los distintos equipos. Los talleres se distribuían en el orden en que se realizaban las tareas, de manera que una cubierta desnuda en el inicio del proceso salía como un buque completo con tripulación al final del canal. Si era necesario, este proceso se podía hacer tan rápido como una hora; el Arsenal en una ocasión produjo más de 100 buques en menos de dos meses.

El siguiente cambio importante, la Revolución Industrial, comenzó en las islas británicas a principios del siglo XVIII. Una de sus causas fue el desarrollo de métodos agrícolas más eficientes que requerían menos tierra y menos campesinos para producir los alimentos necesarios.

Otra causa fue centralizar a los trabajadores, lo cual significaba que alguien, por lo común el dueño, controlaba todo, y en consecuencia los incentivos para mejorar los métodos de producción eran mayores.

En 1776 Adam Smith publicó el concepto de la división del trabajo en su libro *The Wealth ofNations {La riqueza de las naciones).* En lugar de que una persona terminara un producto, sugirió que cada uno fuera responsable de una parte del trabajo. Con la especialización aumentó el número de alfileres producidos por persona de 20 a 48 000 al día. Casi 50 años más tarde, Charles Babbage publicó (1832) *On the Economy ofMachinery and Manufacturers {Sobre la economía de maquinaria y productores)*, reafirmando la idea de la especialización del trabajo.

La especialización del trabajo incrementó el tamaño del mercado en todas las áreas. Conforme las personas se especializaban en sus tareas, dependían más de otros para producir artículos como ropa, zapatos y muebles, creando mercados más grandes. La urbanización produjo grandes ciudades llenas de trabajadores que necesitaban comprar cosas y tenían dinero para gastar, lo que aunado a una mejora del transporte, dio origen a mercados masivos que demandaban producción en masa.

El inicio del **sistema americano** se remonta al desarrollo del torno moderno realizado por Maudslay alrededor de 1800. El aspecto más importante del desarrollo de Maudslay fue que entonces algunas máquinas eran capaces de reproducirse a sí mismas; esto sorprendió a la industria de máquinas herramienta y tuvo un gran impacto en el desarrollo posterior de los sistemas de producción.

Al otro lado del Océano Atlántico, en América, ocurrían eventos fascinantes. Eli Whitney, inventor de la despepitadora de algodón, promovió la manufactura con partes intercambiables. Ampliamente reconocido como el primero en usar esta idea, se ha observado que el Arsenal de Venecia usó partes intercambiables en el siglo XV. Whitney usó dispositivos y artefactos para orientar y sostener partes que de esta manera podían hacer trabajadores menos calificados. Este sistema de manufactura, conocido como el *sistema americano*, fue adoptado por muchas fábricas.

La convergencia de partes intercambiables, especialización del trabajo, la potencia del vapor y las máquinas herramienta marcó el surgimiento del sistema americano, que fue el precursor de la producción en masa de hoy en día.

En 1903, Oldsmobile Motors creó una línea de ensamble estacionaria para producir sus automóviles. El número potencial de automóviles producidos por año se multiplicó por 10. En 1908, la Cadillac demostró que sus partes eran intercambiables. Embarcaron tres automóviles a Inglaterra y los desensamblaron. Mezclaron las partes y volvieron a ensamblarlos. En 1913, la Ford extendió estas ideas a una línea de ensamble en movimiento con partes intercambiables. Cada dos horas salía rodando de la línea de ensamble un automóvil modelo T con un precio razonable de 400 dólares lo que cambió al automóvil de ser un juguete para ricos a ser un producto para masas.

La línea de ensamble es el resultado lógico de la especialización de la mano de obra y del uso de capital para sustituir la mano de obra. No todas las fábricas se convirtieron en instalaciones de producción masiva. Las plantas que hacían una variedad de partes con poca demanda o productos hechos a la medida permanecieron sin cambio.

Las primeras teorías sobre administración surgieron en este ambiente, ya que los sistemas operativos requerían cumplir con demandas crecientes de producción. Al igual que con muchos

otros desarrollos históricos, es difícil señalar su inicio. Muchas personas contribuyeron al proceso, pero Henry Towne marca la avanzada. En 1886 mandó un artículo a la American Society of Mechanical Engineers en el que aseguraba que la administración de la planta era tan importante como la administración de la ingeniería.

Con frecuencia se da el nombre de padre de la administración científica a Frederick Taylor, quien comenzó como obrero en Midvale Steel, y después de realizar diferentes trabajos, ascendió en la jerarquía de la empresa hasta llegar a ingeniero jefe de planta. De su experiencia, Taylor sabía que el mejoramiento debe comenzar por los trabajadores. Sentía que la solución no era hacerlos trabajar más sino organizarlos mejor. La administración debía desarrollar los métodos de trabajo, enseñarlos a los trabajadores y supervisar para que los sigan.

Más tarde, en 1911, Taylor escribió un libro sobre sus teorías, *Principios de la adm inistración científica (The Principies of Scientific Management).* Su propósito al escribirlo era proporcionar ejemplos sencillos del desperdicio a través de la ineficiencia y demostrar que el remedio se encuentra en una mejor administración, no en trabajadores extraordinarios. Además, señaló que la mejor administración es una verdadera ciencia, basada en leyes, reglas y principios bien definidos, aplicables a toda empresa humana y que conducen a resultados sorprendentes.

El caso de la Eastern Rate en 1910 fue un instrumento de avance en la teoría de la administración científica. La Comisión Interestatal de Comercio atendió un caso en el que los ferrocarriles pedían un alza en las tarifas para solventar los crecientes costos. Taylor y otros impulsores de la administración científica (Towne, Gantt, Barth, F. Gilbreth y Emmerson) testificaron durante varios días sobre la ineficiencia de los ferrocarriles. Analizaron formas de reducir costos y elevar los salarios manteniendo las tarifas en el mismo nivel. Louis Brandéis, el abogado que representaba a los ferrocarriles, y los testigos expertos acuñaron el término de *administración científica.* Mediante la publicidad asociada con el caso, tanto el nombre como las teorías fueron ampliamente aceptados.

Conforme la administración científica ganó aceptación en Estados Unidos, Henri Fayol desarrolló sus propias teorías en Francia (Fayol, 1984). Fayol era un ingeniero que más tarde se convirtió en director administrativo de una gran empresa minera. Veía los problemas desde el nivel más alto y no desde la planta, como lo hacía Taylor. Fayol pensaba que una empresa tenía seis funciones: técnica (la capacidad de producción), comercial (comprar y vender), financiera (obtener y asignar dinero), seguridad (protección del personal y la propiedad), contable (llevar libros) y administrativa (planear, organizar, mandar, coordinar y controlar).

La contribución académica al desarrollo de la teoría administrativa llegó después. Entre 1924 y 1927, se estudiaron los niveles de producción de un pequeño grupo de trabajadores en Hawthorne Works de la Western Electric. La idea era cambiar las condiciones de trabajo una a la vez y medir la producción de los trabajadores. Primero se aumentó el nivel de iluminación y, como se esperaba, la producción aumentó. Lo inesperado ocurrió cuando la producción siguió aumentando al bajar el nivel de iluminación. El incremento continuó aun cuando la luz disponible parecía luz de luna. En este punto, se vio que el problema era más complicado de lo que se pensaba y llamaron a Elton Mayo, un profesor de Harvard y el primer académico que hizo contribuciones importantes a la administración de sistemas de producción. Las personas mencionadas antes estaban todos en la práctica. Mayo concluyó que los factores lógicos eran mucho menos importantes que los factores sociales en la motivación de los trabajadores. En esencia, la *atención* que obtuvieron los trabajadores hizo que se sintieran especiales y trabajaran más. De nuevo, la lección es que el factor humano es decisivo en los sistemas de producción.

El ambiente competitivo

El Centro Nacional para las Ciencias de la Manufactura (NCMS, 1988) sugiere:

> La competitividad es el grado en el que una nación puede, bajo condiciones de mercado libres y justas, producir bienes y servicios que cumplan con las pruebas de mercado internacionales, y simultáneamente mantener o ampliar el ingreso real de sus ciudadanos.

Se adoptará esta definición. El mercado global actual ha hecho que la competencia sea más importante que nunca. Así, se estudiará el desarrollo del ambiente competitivo desde la Segunda Guerra Mundial.

1.2.1 Posición en el momento

El consenso es que la competitividad estadounidense ha disminuido en los últimos años. Ahora, en lugar de dominar los mercados mundiales como venían haciéndolo desde la Segunda Guerra Mundial, las empresas estadounidenses están haciendo ajustes, no son líderes (Cohén, Zysman, 1987). Esta situación es desmoralizante si se piensa que las infraestructuras europea y japonesa fueron destruidas durante la guerra y la industria de los Estados Unidos llevaba la delantera.

1.2.2. El deterioro de la competitividad

Estados Unidos puede restablecer su competitividad industrial. Pero primero, debe entender los elementos que le llevaron al deterioro.

Después de la guerra, Estados Unidos ayudó a la recuperación de las arruinadas economías japonesa y europea. El Plan Marshall para la ayuda económica en Europa y el Plan MacArthur en Japón auxiliaron la reconstrucción de la infraestructura industrial de esos países. Los fabricantes estadounidenses no sólo proporcionaron bienes a través de estos planes, la falta de competencia abrió mercados en el resto del mundo para sus productos. Dentro de Estados Unidos, una población exhausta por la guerra y las privaciones estaba lista para comprar cualquier artículo. Al perfeccionar la manufactura, Estados Unidos logró resultados espléndidos en la producción e innovación. Esta era fue la de la producción en masa, y la administración impulsó la tecnología para proporcionar una producción eficiente en costos y bienes estándar de alta calidad. A su vez, los clientes compraban lo que se ofrecía; el mercado estaba garantizado. Esta situación de mercado es un **sistema controlado por la producción.** Se vendía lo que se fabricaba, el cliente tenía muy poca opinión o influencia. La eficiencia en la producción era lo importante.

Debido a factores de mercado, económicos y políticos, algunas compañías estadounidenses comenzaron a operar en otros países. Estas compañías recibieron el nombre de multinacionales. El creciente costo de la mano de obra estadounidense fue la causa de que las empresas salieran al extranjero, en especial al Lejano Oriente, donde la mano de obra era más barata y más productiva. La ventaja en costos obtenida se usaba para vender esos productos en el mercado nacional. El movimiento al extranjero hizo que esos países tuvieran después acceso local a los métodos de producción y técnicas administrativas americanas, y esto tendría un costo para Estados Unidos.

Este país llegó tranquilo a la década de 1970 sin reconocer el impacto de los cambios que tenían lugar en los mercados mundiales. Las compañías estadounidenses continuaron su pro-

ducción masiva eficiente de bienes estandarizados, cuando la demanda cambiaba a distintos niveles de calidad y precio. A principios de la década de 1980 algunas compañías comenzaron a responder al incipiente mercado global. Esta respuesta dio frutos, y esas compañías se dieron cuenta, en los 90, que la importancia de la producción en masa había disminuido. Aunque todavía se usa la producción en masa, la eficiencia en la producción ya no es la única consideración. La filosofía de la excelencia en la manufactura, o de la fabricación de clase mundial, sustituye ahora a la filosofía de la producción en masa.

Entre muchos cambios, el más importante ha sido el refinamiento de los clientes. El cliente es más exigente y busca más variedad, menor costo y calidad ejemplar. La estructura económica del mercado cambió de economía de escala (producción en masa) a economía de alcance (variedad). Esta economía de elección (Starr, 1988) da más importancia a la variedad que a los productos estandarizados. La idea de comprar un automóvil diseñado según el gusto individual respecto a potencia, color y características ha sustituido al síndrome del Ford negro modelo T. La industria se enfrenta a la difícil tarea de combinar la eficiencia de la producción en masa con la variedad artesanal de antes de la Revolución Industrial. El cliente determina la oferta, la industria sigue la demanda. La era del sistema controlado por la producción cambió a un **sistema controlado por el mercado.**

En un sistema controlado por el mercado, el cliente es la fuerza impulsora, al contrario de los sistemas controlados por la producción, en los que el cliente tenía muy poca influencia. Como resultado al responder a las demandas del cliente, el sistema controlado por el mercado opera según cambios dinámicos rápidos, al contrario del ambiente estable de los sistemas anteriores.

La competencia extranjera es un factor dominante en los sistemas controlados por el mercado. El avance más significativo es que el mundo se ha convertido en un mercado global, lo cual se ha acentuado después de los sucesos en Europa oriental y el Lejano Oriente. Más allá de la competencia local o regional de los 70, los fabricantes deben ahora competir no sólo con los países europeos y Japón, sino también con los del Lejano Oriente y América del Sur. Al crecer la competencia de regional a global, también lo hizo la naturaleza de la demanda. El mercado homogéneo (de la era de la producción en masa) se ha convertido en un mercado global heterogéneo fragmentado por la dinámica de la población. Al dejar un mercado en el que un producto sirve para todos, la competencia forzó la fabricación de productos que cumplieran con las necesidades y expectativas de cada consumidor. Los "mercados" no compran, los individuos lo hacen (Starr, 1988). Estos individuos demandan alta calidad y productos y servicios diseñados a la medida. Un mercado de **consumidores** ha evolucionado a un mercado de **prosumidores** [consumidores integrados al proceso de diseño (Starr, 1980)].

Otros factores de cambio en el medio ambiente se resumen como sigue (Skinner, copyright © 1985, John Wiley and Sons, Inc., reimpreso con permiso):

La era de la producción en masa está pasando. El sistema controlado por la producción del pasado ha sido sustituido por el sistema controlado por el mercado del presente y futuro. Los consumidores más refinados exigen opciones, calidad y menor costo (prosumidores en lugar de consumidores). • Han surgido la competencia global y los mercados heterogéneos.

- La tecnología de la información ha cambiado la razón de ser y la naturaleza de los negocios.
- Proliferan nuevos materiales, nuevos procesos de fabricación y nuevas tecnologías de producto.
- Los ciclos de vida de los productos son más cortos.
- Los volúmenes de producto disminuyen y la variedad de productos aumenta.
- Los ciclos de desarrollo de nuevos productos se acortan.
- Una calidad de producto excelente combinada con un costo bajo es lo más importante.
- La mezcla de costos cambia, los costos generales, de material y de capital se elevan y los costos de mano de obra directa bajan.
- La cultura del trabajador, la demografía y la sociología del trabajo son distintos ahora que en la década de los 60.

En la sección 2 se analizarán los sistemas de producción con más detalle.

SECCIÓN 1 EJERCICIOS

1.1. Defina el sistema de producción de la antigüedad.
1.2. Defina el sistema de producción feudal.
1.3. Defina el sistema de producción europeo.
1.4. Defina el sistema de producción americano.
1.5. Compare y establezca las diferencias de los cuatro tipos de producción más importantes.
1.6. Suponga que los trabajadores del Arsenal de Venecia trabajaban 14 horas al día, 6 días a la semana. De los 2000 trabajadores, 1800 eran mano de obra directa. Si se producían 100 barcos en 8 semanas, ¿cuántas horas-hombre se requerían para construir un barco?
1.7. ¿Cuál es el nuevo mensaje que Adam Smith expone en su libro *La riqueza de las naciones!*
1.8. ¿Cuál es la contribución de Whitney a los sistemas de producción?
1.9. Describa la evolución de la línea de ensamble.
1.10. ¿Cuál es el descubrimiento más importante de los experimentos realizados en Hawthorne?
1.11. Resuma la evolución del medio ambiente competitivo.
1.12. ¿Cuáles son las componentes principales de los sistemas controlados por el mercado?
1.13. Analice el impacto de los sistemas controlados por el mercado en la industria automotriz.

2 SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

En el sentido más amplio, un sistema de producción es cualquier actividad que produzca algo. Sin embargo, se definirá de manera más formal como aquello que toma un insumo y lo transforma en una salida o producto con valor inherente. Un buen ejemplo de un sistema de producción es una empresa que fabrica lápices. El insumo es la materia prima como madera, grafito y pintura. La transformación consiste en cortar la madera en hojas, lijarla, hacer las ranuras, agregar la puntilla, unir las hojas, cortar en forma de lápiz y por último pintar el lápiz terminado. Los lápices son la salida. Al pensar en sistemas de producción vienen a la mente grandes operaciones de manufactura, pero otros sistemas son muy diferentes. Por ejemplo, la universidad es un sistema de producción. Los alumnos de primer ingreso son el insumo, la adquisición de conocimientos es la transformación y el producto es una persona con educación. Los sistemas de producción se pueden dividir en dos clases: de manufactura y de servicios. En la

manufactura, por lo general, los insumos y productos son tangibles, y con frecuencia la transformación es física. Por otra parte, los sistemas de producción orientados a servicios pueden tener insumos/productos intangibles, como la información. Las transformaciones pueden no ser físicas, como la educación. Otra diferencia es que los bienes pueden fabricarse anticipando las necesidades del cliente, lo que con frecuencia no es posible en los servicios. La educación es un buen ejemplo; no se puede enseñar a los estudiantes antes de que se inscriban. Para simplificar, este análisis se limitará a sistemas de producción de bienes con fines de lucro.

En los sistemas de producción, casi siempre se piensa en la porción que se puede ver, que es el proceso de transformación. Sin embargo, la mayor parte de los sistemas de producción son como los icebergs, la parte visible es sólo un pequeño fragmento del sistema. Para estudiar los sistemas de producción es necesario considerar muchas de sus componentes que incluyen productos, clientes, materia prima, proceso de transformación, trabajadores directos e indirectos y los sistemas formales e informales que organizan y controlan todo el proceso. Estas componentes llevan a acciones y decisiones que deben tomarse en cuenta para que un sistema de producción opere adecuadamente.

Se estructurará el análisis de los sistemas de producción alrededor de cuatro componentes diferentes: flujo de producción, construcción de bloques del sistema, tecnología y tamaño.

El alma de cualquier sistema de producción es el proceso de manufactura, un proceso de flujo con dos componentes importantes: materiales e información. El flujo físico de los materiales se puede ver, pero el flujo de información es intangible y más difícil de rastrear. Siempre han existido ambos tipos de flujo, pero en el pasado, se daba poca importancia al flujo de información. Como se mencionó, la nueva tecnología de la información ha dado otra forma a los sistemas de producción, de tal manera que el flujo de información es crítico.

En la figura 1-1 se muestra un modelo genérico del flujo físico en un sistema de producción. El material fluye desde el proveedor al sistema de producción para convertirse en inventario de materia prima, después se mueve a la planta donde tiene lugar la conversión del material. El material se mueve a través de diferentes procesos de transformación en las estaciones de trabajo pero no necesariamente va por la misma ruta cada vez. El material en la planta se conoce como inventario de trabajo en proceso (ITP). Al salir de la planta, el material se mueve a un sitio en donde se convierte en inventario de productos terminados. De ahí fluye hacia el cliente,

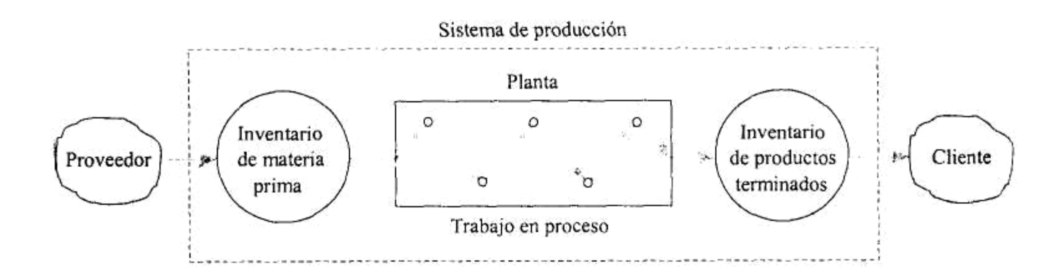
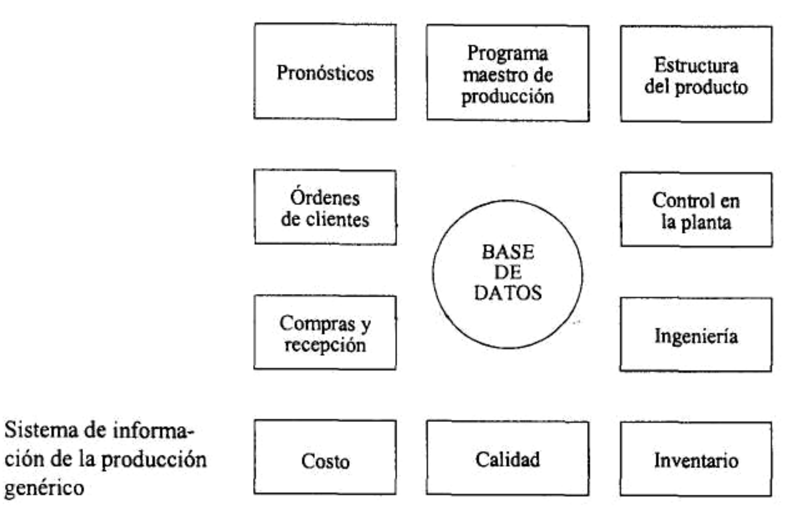


FIGURA 1-1
Flujo físico genérico



Sistema de información de la producción genérico

algunas veces a través de intermediarios como centros de distribución o almacenes. Observe que este análisis de sistemas de producción físicos incluye tanto al proveedor como al cliente. Se profundizará sobre este concepto en el siguiente capítulo.

La figura 1-2 muestra un sistema de información de la producción genérico. Una base de datos común da servicio a todas las funciones y actividades del sistema de producción, en cualquier lugar. El principio que rige es el de integración de la información. El resultado del flujo de información se ve en las terminales que se encuentran en el sistema de producción.

Para mostrar la complejidad de los flujos físicos y de información se considera la fabricación de televisores. Un televisor no es sólo un televisor; la demanda de los clientes incluye una variedad de tamaños, estilos y características. Los tamaños van de una portátil de 2" a las de 45" y pantallas de proyección más grandes. Los estilos incluyen portátiles, modelos de mesa y consolas. Las distintas características incluyen imagen en la imagen, entrada de cable, apagado programado, videocasetera integrada y sistema interactivo de disco compacto. Una planta debe poder fabricar una gama de los televisores demandados y no sólo un modelo estándar. El fabricante debe decidir cuándo y cuántos televisores de cada modelo hacer. Una vez que toma esta decisión la compañía debe proporcionar los insumos, que pueden ser la materia prima sin procesar (madera o plástico para la caja) o componentes complejas hechas en otro lado (cinescopios). Debe ordenarse la cantidad y calidad correctas para estos insumos y deben hacerse arreglos para la entrega a tiempo y el almacenamiento adecuado. Las personas, los procesos y los materiales se coordinan para asegurar que un producto de calidad se complete a tiempo y con bajo costo. Por último, el producto terminado se empaca y se manda al cliente. Aunque proporciona una idea de la complejidad del sistema, esta descripción simplificada ignora otras funciones de un sistema productivo, como la elección de tecnología, el mantenimiento del equipo físico, los aspectos financieros, la publicidad y mercadotecnia y la distribución.

La meta de los sistemas de producción es fabricar y distribuir productos. La actividad más importante para cumplir con esta meta es el proceso de manufactura, en el cual tiene lugar la con-

versión material de transformar materia prima en un producto. El proceso de manufactura se puede ver como un proceso que agrega valor. En cada etapa la conversión realizada (a un costo) agrega valor a la materia prima. Cuando este proceso de agregar valor termina, el producto está listo.

Para ser competitivo, la meta debe ser que la conversión de materiales cumpla, **de manera simultánea,** los siguientes objetivos:

Calidad: el producto debe tener una calidad superior (igual o mejor que la competencia).
Costo: el costo del producto debe ser menor que el de la competencia.
Tiempo: el producto debe entregarse a tiempo al cliente, siempre.

Existe interacción entre estos objetivos; por ejemplo, los clientes aceptan un precio más alto cuando el producto es único y menor calidad si los productos son más baratos.

Más adelante se profundizará sobre estos tres objetivos. Se introducen en este momento porque, en cierta forma, constituyen la esencia de este libro. Una compañía que cumple con estos objetivos de manera simultánea, se encuentra, en cuanto a producción, en una posición competitiva.

Aunque existen muchos elementos que apoyan el logro de estos objetivos, aquí sólo se analizarán dos: la estructura física y la organizacional.

2.2.1 Estructura física

El proceso de conversión de materiales se lleva a cabo en la planta de producción, que está diseñada para facilitar la conversión. El volumen de producción y la variedad de productos determina el tipo de diseño, o **distribución de planta (layout).** Considere por ejemplo un fabricante de sillas. Se puede intuir que el proceso de manufactura para hacer 50 sillas idénticas sería distinto a uno para producir 50 000 sillas. Además, producir el mismo número de sillas de cinco tipos distintos sería un problema complejo. Para cumplir con esta variedad de necesidades han surgido dos tipos de distribución de planta diferentes en esencia: el **taller de producción intermitente y la planta de producción continua.**

La producción intermitente fabrica un volumen bajo de productos según pedido, como 25 sillas de tres modelos diferentes. La producción intermitente tiene varios elementos en común. Los trabajadores deben estar capacitados para hacer varios productos. De manera similar, casi siempre se usa equipo para propósitos generales que puede manejar, dentro de ciertos límites, distintos tipos de trabajos. Por ejemplo, una máquina de coser es equipo de propósitos generales para la industria de la ropa. La última característica de un taller intermitente es que cada trabajo sigue su propia trayectoria o ruta en la planta.

Una distribución de planta representativa para un taller de producción intermitente es una **distribución por proceso** en la que se agrupan máquinas similares. Por ejemplo, en un taller de maquinado (el taller clásico), los tornos se colocan en un área y las fresas en otra, como se muestra en la figura 1-3. También se muestra la ruta que siguen dos trabajos distintos en esta distribución. Es evidente que al aumentar la variedad de productos las rutas se complican. Aun cuando puede ser difícil administrar un taller intermitente, una gran parte de la producción se realiza en este tipo de diseño.

Una **planta de producción continua** fabrica un alto volumen de productos estandarizados. La industria automotriz es un buen ejemplo. Una línea de ensamble mantiene el flujo de

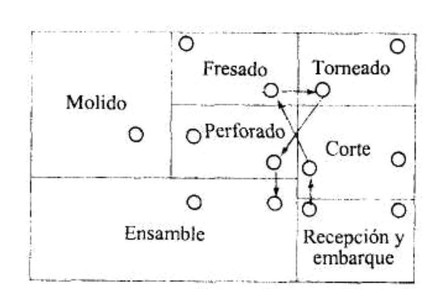


FIGURA 1-3
Distribución por proceso o funcional

materiales, puede producir cientos de miles de automóviles de un modelo dado, y la producción puede durar años. Los trabajadores usan equipo especializado, necesitan pocas aptitudes y pueden realizar menos tareas que en el taller de producción intermitente.

Cada producto en el flujo de producción sigue la misma secuencia de operaciones. La secuencia de fabricación o las operaciones de ensamble requeridas por el producto determinan la distribución. Una planta de producción continua emplea una **distribución por producto.** El equipo se coloca de manera que el producto siempre siga la misma ruta a través de la planta (figura 1-4). Además de la industria automotriz, los fabricantes de electrodomésticos y productos electrónicos usan la distribución por producto. La administración de una planta de producción continua difiere de la del taller intermitente. En lugar de la programación diaria, el problema crítico es establecer y balancear las tareas que se realizan en la línea de ensamble para asegurar una operación estable.

Entre estos extremos de plantas productivas se encuentra un híbrido, la **planta de producción por lote.** Este tipo de planta no produce volúmenes altos; produce en lotes que varían en tamaño desde unas cuantas a miles de unidades. Es posible realizar cierto grado de producción por pedido, aunque no tanto como en el taller intermitente.

En ocasiones se puede hacer un solo producto por pedido. Este sistema de producción es un **taller de producción por proyecto;** su producto es un trabajo de una sola vez. Esta distribución es un caso extremo de un taller intermitente que hace un producto único hecho a la medida. Un taller de proyectos usa una **distribución por posición fija.** El producto (barcos, aviones) se queda en un lugar y el equipo se mueve hasta él.

Así como el taller de proyectos es una versión extrema de la producción intermitente, el **taller de producción de flujo continuo** es una extensión radical de la planta de producción continua. El taller de flujo continuo se caracteriza por una circulación continua, como en la industria del petróleo y la química. No se producen unidades discretas sino que los líquidos que fluyen por tuberías sufren una transformación química para convertirse en el producto final. Debido a que nos ocuparemos sólo de la producción discreta, no se prestará más atención a los talleres de producción continua.

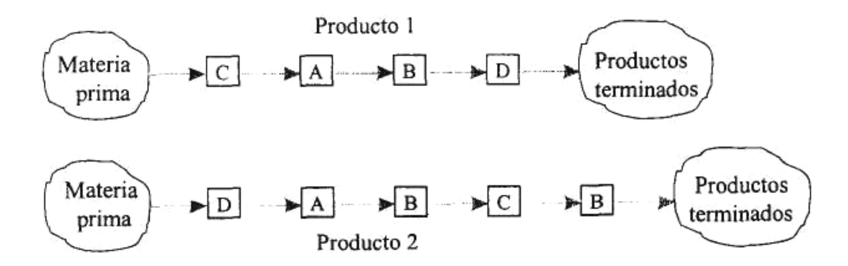
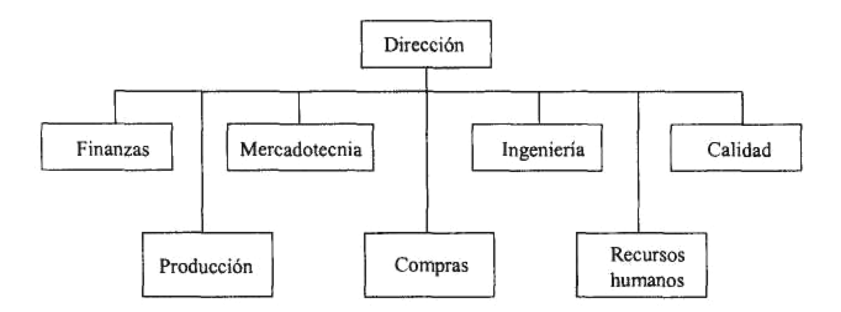


FIGURA 1-4
Distribución por producto



Organización funcional

Las últimas distribuciones físicas que existen son las **plantas modernas.** Éstas se clasifican como sistemas de producción integrada (IPS) y los tres tipos principales son: sistemas de manufactura en células (CMS), sistemas de manufactura flexible (FMS) y manufactura integrada por computadora (CIM). Las plantas modernas se estudian en el capítulo 2.

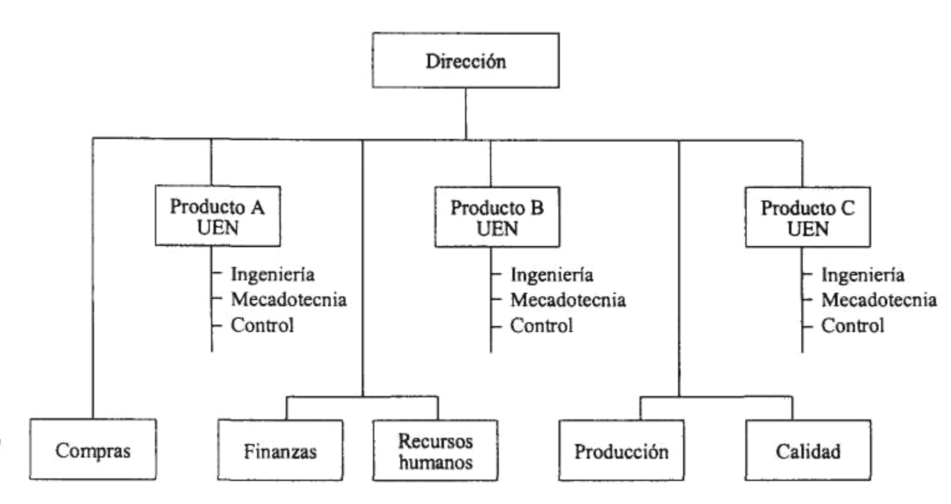
La meta de las organizaciones es subdividir las tareas complejas en componentes más simples mediante la división del trabajo. El diseño de una estructura para lograrlo toma en cuenta dos aspectos principales: cómo dividir el trabajo y cómo coordinar las tareas resultantes (Hax y Majiluf, 1981). La organización de una industria afecta su sistema de producción, de manera que debe comprenderse el ambiente organizacional. Existen tres tipos de estructuras organizacionales: funcional, divisional y matricial.

Las estructuras funcional y divisional son clásicas, pero opuestas. La estructura **funcional** se construye alrededor de los **insumos** usados para lograr que se realicen las tareas de la organización. Estos insumos se agrupan según la especialización de las funciones, por ejemplo, ingeniería, producción, finanzas, mercadotecnia, recursos humanos, calidad, etc. En la figura 1-5 se muestra un organigrama funcional simplificado. Una gráfica más completa dividiría cada función en sus subfunciones.

La estructura **divisional** se construye alrededor de la **salida** generada por la organización. Lo más común es que la organización se estructure alrededor de sus productos. Sin embargo, una estructura divisional se puede construir según sus proyectos, servicios, programas, clientes, mercados específicos o localización geográfica. En la actualidad una estructura divisional se conoce como *unidad estratégica de negocios* (UEN). En la figura 1-6 se puede ver una estructura divisional por producto. Cada unidad estratégica de negocios tiene funciones separadas de ingeniería (que incluyen investigación y desarrollo), mercadotecnia y control. La función de control tiene una gran importancia para la unidad estratégica de negocios. Otras funciones como producción o compras pueden o no quedar centralizadas.

Los administradores en una organización funcional tienen autoridad limitada con responsabilidad. En la estructura de unidades estratégicas de negocios tiende a tener más responsabilidad que autoridad. Por otro lado, una organización en unidades estratégicas de negocios está más orientada al cliente y, por lo tanto, es más común en los sistemas orientados al mercado.

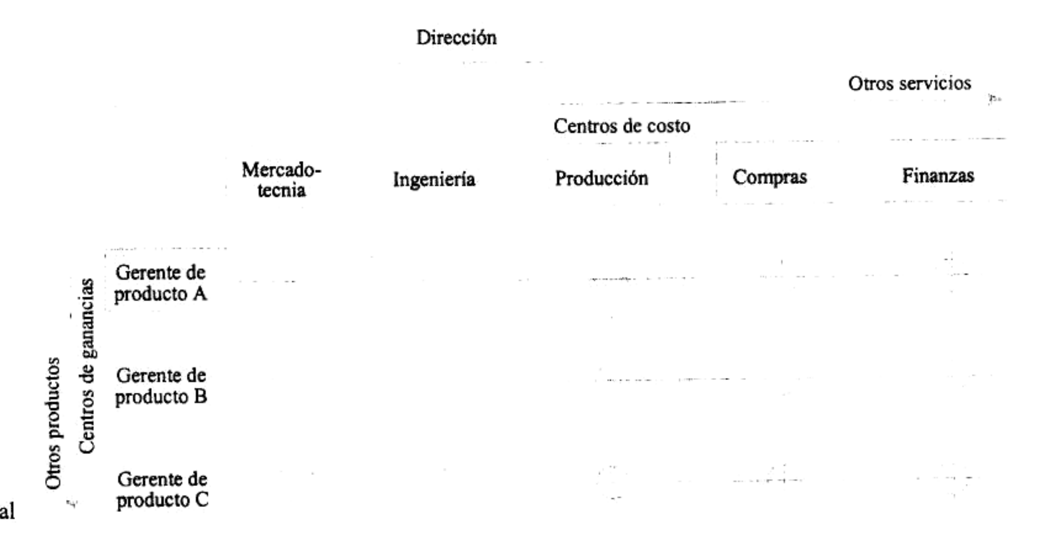
Tanto la estructura divisional como la funcional están diseñadas en una dirección ya sea de los insumos o de los productos, esto mantiene una jerarquía de "una persona, un jefe" en toda la empresa. Una organización **matricial** se estructura alrededor de dos o más conceptos centrales



Organización divisional por producto (UEN)

de diseño. Una persona puede tener más de un jefe, lo que lleva a cierta ambigüedad dentro de la organización. En una organización matricial un gerente de proyecto o de producto es responsable de que se termine el proyecto o del desarrollo exitoso y venta del producto. El gerente de proyecto no tiene control directo sobre los recursos y debe contratar a otras funciones de la organización para realizar cada una de sus componentes. En la figura 1-7 se muestra una organización matricial por producto. Ilustra la manera en que surge una situación de dos jefes. Un empleado de un departamento funcional también es responsable ante el jefe del proyecto; el efecto es que el empleado tiene dos jefes. Es difícil manejar organizaciones matriciales y por lo general se encuentran en organizaciones de investigación y desarrollo.

Estos tres tipos de organización son estructuras puras. En la realidad una organización puede ser un híbrido de dos de ellas o de las tres. El patrón dominante en un híbrido se puede analizar hasta encontrar los modelos puros.



Organización matricial

En la sección 1.2 se analizó la evolución de los sistemas de producción controlados por el mercado. Gon estos sistemas surgió un nuevo paradigma de la producción: los llamados productos o industrias de alta tecnología. En esta sección se profundizará en este paradigma y su impacto en los sistemas de producción.

Aunque es difícil llegar a un acuerdo sobre la definición de la industria de alta tecnología, es evidente que los adelantos tecnológicos aumentan de manera constante. Igualmente claro es que estos adelantos causan cambios básicos en los productos, procesos y técnicas administrativas. Para incorporar y aprovechar los adelantos tecnológicos e ingresar al dominio de la alta tecnología, la industria debe aceptar dos realidades:

- Estos avances son importantes e incluyen un cambio en ei capital y en las habilidades complementarias.
- Estos avances requieren de manera inherente un compromiso con el cambio continuo (Diván y Chakraborty, 1991).

En la actualidad ciertos productos o industrias se reconocen como de alta tecnología; por ejemplo, la industria de la aviación y naves espaciales, la electrónica, las telecomunicaciones, la de las computadoras, la farmacéutica, la óptica y la de materiales compuestos. Para adentrarnos en este estudio se requiere una definición más específica. Diván y Chakraborty (1991, p. 23) identifican tres criterios usados para clasificar las industrias como de alta tecnología.

- Los gastos en investigación y desarrollo son más altos que un porcentaje mínimo sobre ventas.
- La proporción de personal científico y tecnológico sobre el total de empleados es mayor que cierto nivel.
- El producto tiene cierto grado percibido de refinamiento tecnológico.

El tercer criterio es subjetivo y es la razón por la que se incluyeron algunas industrias en la lista anterior. Los dos primeros son más objetivos. La oficina de estadísticas del trabajo [Bureau of Labor Statistics (1982)] ofrece definiciones para obtener un valor más específico para estos cocientes. Observe que estos dos criterios no dependen del producto. La suposición tácita es que el producto de alta tecnología crea un medio ambiente independiente del producto mismo. Cada vez más industrias que tradicionalmente se percibían como de baja tecnología cambian a la alta tecnología. Por ejemplo, la industria del zapato es cada vez más compleja con una alta inversión en investigación y desarrollo y procesos automatizados.

¿Qué impacto tiene la alta o baja tecnología en un sistema productivo? Como se hizo notar, un producto de alta tecnología tiene impacto en todo el ambiente de producción y requiere un cambio constante. Por lo tanto, la planeación, administración y control de la producción no pueden permitirse atrasos. Para fabricar un producto de alta tecnología, todas las actividades de apoyo deben adquirir el mismo refinamiento que el ambiente de alta tecnología.

El ambiente de baja tecnología puede no requerir actividades de soporte complejas, pero no están excluidas. *Confrecuencia, las industrias de baja tecnología se pueden beneficiar con las técnicas de planeación y control de la producción sofisticada.* Los enfoques que se estudian en este libro se aplican tanto a las industrias de alta tecnología como a las de baja tecnología.

2. 4 Tamaño de la organización

Las organizaciones difieren en tamaño y alcance, y estas diferencias tienen un impacto en los sistemas de producción. Se examinarán tres aspectos de este impacto: el proceso físico, el proceso administrativo y las decisiones de administración de la producción.

No importa el tamaño de la organización, el proceso físico en cada sistema productivo es de naturaleza similar. El flujo físico genérico (figura 1-1) y la distribución de planta correspondiente tiene mucho en común para cualquier tamaño de organización. La diferencia estriba en la complejidad relativa. Las organizaciones pequeñas tienen un flujo de materiales bastante directo, ya que tienen un volumen de productos y variedad limitados. Las organizaciones grandes con una mezcla de productos más amplia pueden tener muchas rutas de flujo dentro del sistema productivo. Aunque la localización física puede ser distinta, cada flujo específico sigue el patrón general descrito.

Ya se hizo notar que las estructuras organizacionales varían. El proceso administrativo es diferente en las empresas grandes en contraste con el de las pequeñas. Cada organización tiene un proceso administrativo distinto, aun cuando los procesos físicos sean en esencia iguales. La diferencia más importante surge en el flujo de información y el proceso de toma de decisiones correspondiente. En una organización funcional las decisiones están más centralizadas que en las unidades estratégicas de negocios. Debido al tamaño, las decisiones en una empresa pequeña son más centralizadas.

Las decisiones de administración de la producción constituyen otro elemento de interés. Estas decisiones son prácticamente las mismas en cuanto a su contenido en cualquier tipo de organización. La generación de un pronóstico de demanda futura, los planes de preparación de la producción y la compra de materiales son decisiones genéricas que se toman en compañías de todos los tamaños. Aún más, se usa el mismo tipo de herramientas para administrar la producción. De nuevo, la diferencia está en la complejidad y el alcance En una compañía pequeña, un pronóstico o un plan de producción se pueden generar en una computadora personal con un paquete sencillo. Una organización grande puede necesitar software y hardware más complejos para las mismas actividades.

La diferencia más importante entre las organizaciones industriales pequeñas y grandes es el flujo de información y el proceso de toma de decisiones que se emplea y no el flujo físico.

SECCIÓN 2 EJERCICIOS

1.14. Defina un sistema de producción.
1.15. Identifique un sistema de producción de su elección y defínalo.
1.16. ¿Cuáles son las cuatro componentes principales de un sistema de producción?
1.17. Considere un sistema productivo que fabrica bicicletas. Identifique el flujo de materiales y el flujo de información.
1.18. Explique las dificultades que existen para cumplir simultáneamente con los tres objetivos de con versión de materiales.
1.19. Analice las interrelaciones entre una planta de producción continua, un taller intermitente, la distri bución por proceso y la distribución por producto.
1.20. "En una organización divisional se prefiere la efectividad en el mercado a costa de alguna ineficiencia interna." Establezca si está o no de acuerdo con esta afirmación y explique por qué.
1.21. ¿Por qué son comunes las organizaciones matriciales en ambientes de investigación y desarrollo?

1.22. Proponga un organigrama para el Arsenal de Venecia.
1.23. Proponga una distribución de planta posible para el Arsenal de Venecia.
1.24. Establezca si los siguientes productos son de industrias de alta o baja tecnología y haga un análisis: muebles, derivados de leche, cosméticos, bicicletas, refrescos.
1.25. Analice la siguiente afirmación: "La diferencia principal entre las organizaciones industriales grandes y pequeñas es el flujo de información y el proceso de toma de decisiones empleado y no la naturaleza del proceso físico."

3 TECNOLOGÍAS PARA LA ADMINISTRACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

Para este momento nos damos cuenta de que los sistemas de producción son complejos y requieren administrarse. Las tecnologías de administración de la producción comprenden muchos aspectos; algunos de ellos son comportamiento, tecnología de procesos, calidad y planeación y control de la producción (PCP). Se dedicará la atención a PCP porque es una parte significativa de esta tecnología de administración de la producción y el tema más importante de este libro. Se examinará la evolución de la tecnología de PCP, se definirá la vasta área que representa, se introducirá el concepto de ciclo de vida del producto y se analizarán las tecnologías pertinentes.

3.1Evolución

Ya se estudiaron las contribuciones de los pioneros en administración como Taylor y Fayol. Taylar abrió el camino del análisis orientado a las operaciones. Gantt, su contemporáneo y asociado, agregó otra dimensión al trabajo de Taylor al reconocer que un proceso es una combinación de operaciones. Desarrolló un método rudimentario para programarlas, la gráfica de Gantt. Esta gráfica se usa actualmente y maneja problemas de programación y el ambiente de los proyectos. En el capítulo 8 se estudian las gráficas de Gantt con más detalle.

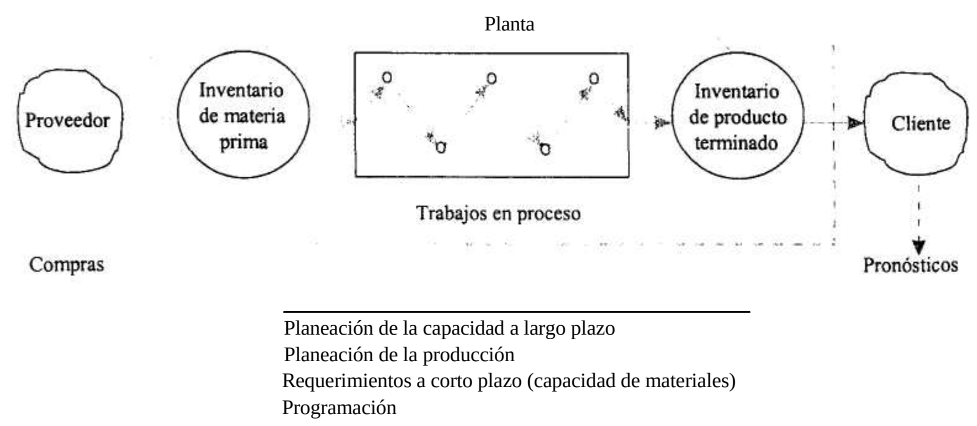
En la misma época, Frank y Lillian Gilbreth (Gilbreth and Gilbreth, 1917) trabajaron en equipo para desarrollar más el campo del análisis de las operaciones. Dieron origen a la idea de que las operaciones se pueden desglosar en componentes de trabajo independientes, como tomar, buscar y soltar. Al unir estas componentes en diferentes formas se crean las operaciones. Su trabajo es una base para los estándares de tiempo predeterminados que se usan para estimar tiempos de operación, datos importantes para la planeación y el control de la producción.

Shewhart propuso uno de los primeros enfoques cuantitativos para PCP. En la década de 1920 desarrolló una teoría organizada de control de calidad estadístico aplicado a las operaciones de manufactura. Su razonamiento para manejar la variación fue una novedad que sustituyó los enfoques determinísticos usados hasta el momento.

El siguiente paso en PCP cuantitativos fue la investigación de operaciones (10). La 10 tuvo sus inicios en la Gran Bretaña durante la Segunda Guerra Mundial como un subproducto de los esfuerzos de los países aliados por desarrollar métodos más poderosos para manejar problemas de operación complejos. Después de la guerra, la IO continuó su desarrollo y cada vez se aplicaba con más frecuencia en medios no militares como los sistemas de producción. La computadora dio un impulso adicional a esta aplicación, y hoy la investigación de operaciones y la

Administración de inventarios

Sistema de producción



Planeación de la capacidad a largo plazo
Planeación de la producción
Requerimientos a corto plazo (capacidad de materiales)
Programación

Elementos de planeación y control de la producción

Estimación de costos y control de calidad

tecnología de las computadoras son herramientas importantes en planeación y control de la producción.

La tecnología de planeación y control de la producción combina los flujos físicos y de información para administrar los sistemas de producción. Igual que cualquier unidad compleja, PCP consta de varios elementos. En la figura 1-8 se colocaron estos elementos en el flujo físico de un sistema de producción.

Los elementos están colocados en varios lugares a lo largo de la ruta del flujo. No se muestra la interacción entre ellos. La función de PCP integra el flujo de material usando la información del sistema. La integración se logra a través de una base de datos normal (figura 1-2).

La interacción con el ambiente externo se logra pronosticando y comprando. El pronóstico de la demanda de los clientes da inicio a la actividad de planeación y control de la producción. Las compras comunican al sistema de producción los insumos proporcionados por los proveedores externos. El extender la planeación y control de la producción a los proveedores y clientes se conoce como **administración de la cadena de proveedores.**

Algunos elementos están asociados con la planta misma. La planeación a largo plazo de la capacidad garantiza que la capacidad futura será adecuada para cumplir con la demanda futura, y puede incluir equipo, personal y también materiales. Esta decisión se toma con la ayuda de una técnica llamada planeación agregada. La planeación de la producción transforma los pronósticos de demanda en un plan maestro de producción, el cual toma en cuenta la disponibili-

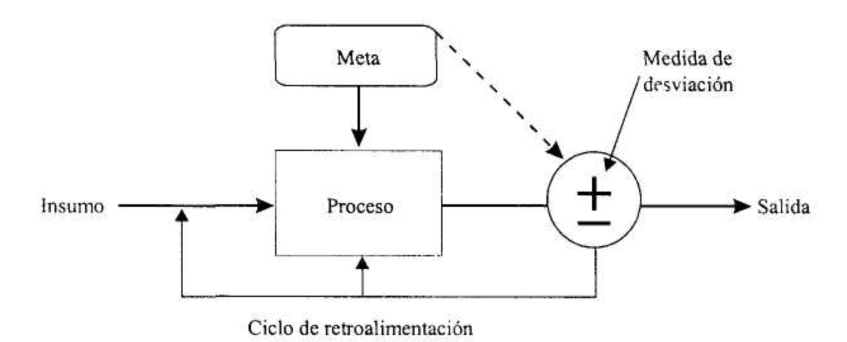


FIGURA 1-9
Ciclo de control de retroalimentación

dad global de capacidad y materiales. La planeación detallada genera los requerimientos inmediatos de los materiales y la capacidad, y realiza una programación de la producción a corto plazo. Adicionalmente, la administración del inventario mantiene y controla la materia prima, el trabajo en proceso y los bienes terminados. La estimación y control de costos y el seguimiento de la calidad incluyen todas las componentes del sistema de producción.

Muchos de estos elementos se relacionan con actividades efectuadas por otras funciones, por ejemplo, el departamento de compras o la función de producción. PCP hace exactamente lo que su nombre dice: planea y controla la producción. Para entender cómo se hace esto, se usa un ciclo de retroalimentación (figura 1-9).

El corazón del ciclo es un proceso; puede tratarse de compras, producción, costos, inventario, etcétera. Cada proceso individual tiene una entrada y una salida específicas. En el proceso de inventarios, el material que fluye entra y sale. La diferencia en las tasas de flujo determina el nivel de inventario. Cada proceso tiene una meta, de nuevo específica. La meta de producción puede ser un plan de producción, mientras que la de costos puede ser operar dentro de cierto nivel de costos.

Se mide la salida del proceso actual y se compara con la meta. Cualquier desviación retroalimenta al proceso o su entrada. El control de la desviación hace que cambie el proceso o la entrada. Las funciones principales de PCP son establecer las metas y medir las desviaciones. Entonces, la esencia de la planeación y control de la producción consiste en la **administración de las desviaciones** al mismo tiempo que las metas son consistentes con las de la organización. La meta es la optimización de los sistemas, y no la optimización de sólo un elemento.

3 3 Ciclo de vida de un producto

El ciclo de vida de un producto describe la evolución del producto según lo miden las ventas a través del tiempo. Las cinco etapas de la vida de un producto son planeación del producto, introducción, crecimiento, madurez y declinación. La figura 1-10 muestra las ventas en cada etapa.

La planeación del producto es la etapa de desarrollo en que se determinan tanto el diseño del producto como su proceso de producción. No hay ventas en esta etapa.

La *introducción* representa un periodo de bajo volumen de ventas. El producto se refina y comienzan los esfuerzos de comercialización.

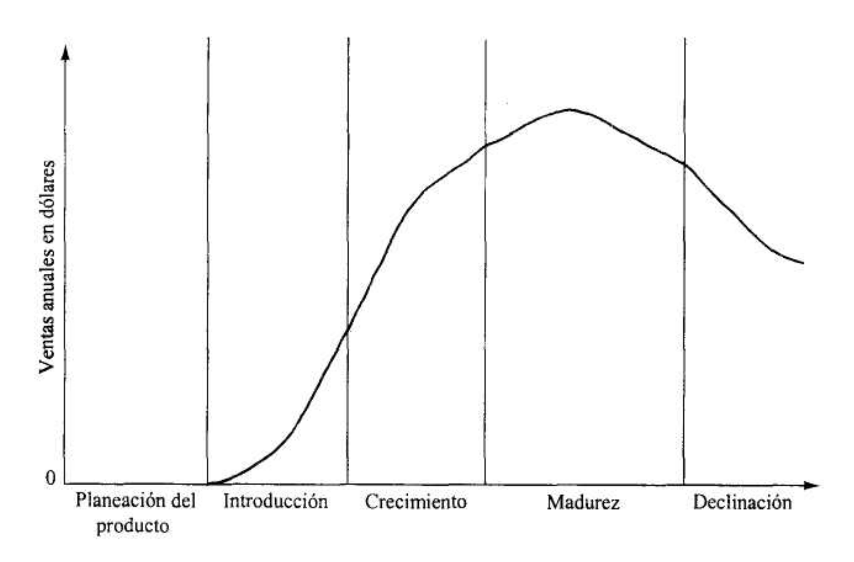


FIGURA 1-10
Ciclo de vida de un producto

En la etapa de *crecimiento* el producto crece con rapidez y hay un aumento acelerado en las ventas. Este periodo es difícil para la organización de la manufactura que tiene que cumplir con el incremento en el volumen de ventas.

En la *madurez* se observa una disminución en la tasa de crecimiento, conforme se va saturando el mercado. La demanda es estable y puede declinar poco a poco.

Se ve una baja en la demanda del producto en la etapa de *declinación.* El producto ha sido remplazado por nuevos productos. Las ventas y las utilidades disminuyen y, en algún momento, se detiene la producción.

Ni los ciclos de vida ni la duración de cada etapa son iguales para todos los productos. Para algunos el ciclo de vida puede ser corto (varios años para productos de alta tecnología o una temporada para artículos de moda). Otros productos pueden sobrevivir años. Si se modifica un producto puede alargarse su ciclo de vida. Como se estudiará en la siguiente sección, las distintas etapas del ciclo de vida de un producto requieren que varíe la administración de la tecnología.

3.4 Tecnología apropiada

Reflexionemos en lo que se ha aprendido hasta ahora. Los sistemas de producción son complejos, tienen el mismo flujo material genérico pero diferente flujo de información, pueden ser de alta o baja tecnología y sus procesos de toma de decisiones dependen de su tamaño. Una complicación más se ve cuando se toma en cuenta el ciclo de vida del producto.

Las tecnologías de administración de la producción representan la base del conocimiento desarrollado a través de los años para manejar este medio complejo. Esta base de conocimiento usa técnicas que han surgido para resolver diferentes tipos de problemas.

La cuestión es seleccionar la mezcla adecuada de tecnologías de administración de la producción, esto se estudiará en capítulos posteriores, después de presentar por separado cada

tecnología. Por ejemplo, se analizarán los pronósticos en el capítulo 4, se relacionarán con el inventario en el capítulo 6 y más adelante se integrarán al estudiar la planeación de requerimientos de materiales en el capítulo 7. Estas técnicas representan el enfoque "científico" para seleccionar la tecnología. En la realidad, lograr una asociación exitosa entre la tecnología y el problema es tanto un "arte" como una ciencia. Se necesita experiencia; sin embargo, existen ciertos consejos que pueden ayudar al enfrentarse con la elección.

Inicialmente, se debe estar consciente de que las distintas etapas del ciclo de vida del producto pueden requerir técnicas diferentes. Es común que las etapas de planeación e introducción del producto (figura 1-10) abarquen actividades tipo proyecto. Así, es apropiado el enfoque de administración de proyectos (capítulo 9). Además, en esta etapa se hacen pronósticos a largo plazo y debe planearse la capacidad (capítulos 4 y 5). Durante la etapa de crecimiento deben usarse modelos dedicados a cambios dinámicos. En esta etapa se puede introducir, por ejemplo, MRPII (capítulos 7 y 10) y realizar una programación detallada de la producción (capítulo 8) y la administración del inventario (capítulos 6 y 7). La etapa de madurez requiere que se usen estas técnicas, pero dando más importancia a los modelos estáticos que a los dinámicos. La situación cambia cuando se llega a la etapa de declinación; se vuelve dinámica de nuevo, aunque esta vez para decrecer.

La mezcla adecuada depende también del tipo de organización con la que se trabaja. Como se vio, deben considerarse tanto las disposiciones físicas como las organizacionales y el grado de refinamiento técnico.

Una guía esencial al diseñar un sistema de PCP es la frase "sencillo y bello". Esto no es tan simple como suena; es trivial encontrar una solución complicada para un problema sencillo. Sin embargo, se requiere un mayor esfuerzo para encontrar un solución sencilla para un problema complicado. En la mayoría de los casos, con el tiempo, la solución más sencilla será la mejor.

La etiqueta del precio de implantar tecnologías de administración puede ser grande o pequeña, ya sea por el tiempo invertido o por los costos. Por ejemplo, instalar un sistema MRP II puede costar de unos cuantos miles de dólares a varios cientos de miles. La regla es no gastar más de lo que se puede ganar, que es otra manera de establecer una ley básica de economía, la de los rendimientos devaluados. En forma más precisa, se gasta sólo hasta el punto en que los costos marginales son iguales a los rendimientos marginales. Habiendo examinado aquello que puede ayudar a la toma de decisiones, se estudiarán los tipos de decisiones.

1.26. Considere la producción de lápices descrita en la sección 2. Dibuje el flujo físico para este proceso de producción e identifique la manera en que interactúan los elementos de PCP con ese flujo físico en el medio ambiente específico.

1.27. Utilice el ciclo de control de retroalimentación para analizar el inventario de lápices terminados para el proceso de producción de lápices si la meta para el nivel de inventario es 1000 lápices.

1.28. Repita el ejercicio 1.27 para el proceso de producción, pero suponga que la producción semanal se planea en 10 000 lápices.

1.29. Analice los aspectos de la "administración de las desviaciones" respecto a las metas de los ejercicios 1.27 y 1.28.

1.30. Estime el ciclo de vida de los siguientes productos: computadoras personales, relojes de pulsera, diamantes, automóviles, libros de texto universitarios, revistas, obras de Broadway.

5. RESUMEN

Este capítulo es una introducción a los sistemas de producción. En él se establece el escenario para el resto del libro. Se describió el mundo como un sistema comercial abierto donde la competencia global es un factor primordial. Los sistemas de producción tienen un lugar en este mercado global.

Después se identificaron cuatro etapas importantes en la evolución de los sistemas de producción. El sistema antiguo tuvo sus inicios alrededor de 5000 a.C. cuando los sacerdotes sumerios comenzaron a registrar inventarios. Un milenio más tarde los egipcios introdujeron los conceptos administrativos básicos de organización, administración y control. En 1500 a.C. los hebreos usaban el principio de excepción y en 350 a.C. los griegos adoptaban la especialización del trabajo.

El sistema feudal fue un producto de la Edad Media con su sistema de producción doméstico.

El sistema de la fábrica europea surgió durante el Renacimiento, como se ve con el desarrollo del Arsenal de Venecia. Sin embargo, el desarrollo más importante de esta era fue la Revolución Industrial en las islas británicas a principios del siglo XVlli que dio origen a la teoría de la administración de la producción. Adam Smith desarrolló, en su libro *La riqueza de las naciones,* el principio de la división del trabajo.

El sistema de la fábrica americana surgió cuando Eli Whitney usó partes intercambiables y dispositivos. La línea de ensamble y la producción en masa fueron también producto de esta era.

La administración científica fue el punto de despegue del sistema americano. Por defender la idea de que la administración es una ciencia basada en principios y leyes bien definidos, Frederick Taylor se considera el fundador de la administración científica. Fayol también hizo grandes contribuciones. Dos puntos sobresalientes en su desarrollo fueron el caso de Eastern Rate en 1910 y los experimentos Hawthorne en la década de los 20.

Dominante durante dos décadas de la posguerra, el sistema americano fue un sistema controlado por la producción que suponía el mercado garantizado. La complacencia estadounidense los llevó a ignorar el surgimiento de las potencias industriales competitivas, en especial Japón. El papel del mercado en los sistemas de producción ganó importancia y condujo a los sistemas controlados por el mercado. La competitividad estadounidense declinó hasta principios de los 80 cuando inició su resurgimiento. La era de la producción en masa declinó, y vino la era de los sistemas controlados por el mercado. Este cambio fue el resultado de la creciente exigencia del consumidor.

Los sistemas de producción estaban definidos formalmente como "aquello que toma insumos y los transforma en productos con valor inherente". Esta definición cubre tanto la manufactura como el servicio, aunque aquí se limitará el estudio a sistemas de manufactura lucrativos.

Lo más valioso del sistema de producción es el proceso de manufactura. Es un proceso de flujo compuesto por dos elementos principales: flujo (físico) de materiales y flujo de información. Un sistema de fabricación de televisores demuestra lo complejo que pueden ser los flujos físico y de información. De este proceso se vio que los sistemas de producción son como los icebergs: sólo una pequeña parte del sistema es visible.

Cualquier sistema de producción debe cumplir tres objetivos simultáneos: calidad, costo y tiempo. Existe un orden físico y uno organizacional para apoyar estos objetivos. El orden físico

maneja la producción en la planta, la cual puede ser intermitente, en línea, por lotes, por proyecto, continua o moderna. Las primeras dos son tradicionales, la última adquiere una aceptación creciente.

Dos órdenes organizacionales, clásicos y opuestos, son el funcional y el divisional (UEN). La organización matricial representa un híbrido de los anteriores y rompe la regla de "una persona, un jefe". Estos tres tipos de estructura organizacional son estructuras "puras". En la realidad, la estructura de una organización puede ser el resultado de una mezcla de dos o de las tres.

Los sistemas de producción también se pueden clasificar como de alta o baja tecnología. Se presentaron tres criterios para distinguir los sistemas de alta tecnología. En ellos no se pueden retrasar ni la planeación de la producción, ni la administración, ni el control. Con frecuencia, los sistemas de baja tecnología se pueden beneficiar con el uso de técnicas refinadas de planeación y control de la producción.

Aunque las organizaciones difieren en tamaño y alcance, el flujo físico genérico y las distribuciones correspondientes difieren sólo en la complejidad relativa. Las diferencias en el ñujo de información afectan el proceso de toma de decisiones de la administración.

Las tecnologías de administración de la producción son herramientas necesarias para dirigir los sistemas de producción. La herramienta principal es la planeación y control de la producción (PCP). Entre los pioneros de PCP se encuentran Gantt, los Gilbreth, Shewhart y quienes desarrollaron la investigación de operaciones durante y después de la Segunda Guerra Mundial.

PCP es un sistema de información basado en el flujo de materiales integrado. Algunos elementos afectan una parte del flujo físico y otros el proceso total. El proceso de planeación y control se basa en el ciclo de retroalimentación de la teoría de control, y la esencia de PCP es la administración de las desviaciones.

Las tecnologías de administración de la producción consisten en varias técnicas para resolver distintos problemas con profundidad diferente. El "arte" y la "ciencia" radican en la selección adecuada de la mezcla de estas tecnologías. Cada etapa en el ciclo de vida de un producto puede requerir una tecnología diferente y la estructura organizacional también puede afectarlas. La guía general más útil es "sencillo y bello". También debe recordarse que los esfuerzos no deben exceder el punto de rendimientos menores.

Las tecnologías de administración de la producción apoyan las decisiones tomadas en los sistemas de producciór La naturaleza de las decisiones varía según si el horizonte es a largo, mediano o corto plazc y las decisiones y horizontes correspondientes se llaman estratégicos, tácticos u operativos. Las decisiones en un sistema de producción se pueden clasificar usando tres criterios: la jerarquía organizacional, el tiempo y el tema. La tabla 1.1 presenta un escenario de decisiones para la planeación de la producción.

6. REFERENCIAS

Babbage, Charles, *On the Economy of Machinery and Manufactures*, R. Clay, Primer, Londres, 1832.

Cohén, S. S, y Zysman, J., *Manufacíuring Matters: the Myth of the Post Industrial Economy,* Basic Books, Nueva York, 1987. Copely, F. B., *Frederick W. Taylor: Father ofScientifw Management,* vols. I y II, Harper & Row, Nueva York, 1923. Diván, R. y Chakaborty, C, *High Technology and International Competitiveness,* Praeger, Nueva York, 1991.

Duncan, W. J., *Great Ideas in Management,* Jossey-Bass Publishers, San Francisco, 1989. Emmerson, H., *The Twelve Principies ofEfficiency,* The Engineering Magazine Company, Nueva York, 1924. Fayol, H., *General and Industrial Management,* Institute of Electrical and Electronics Engineers, Nueva York, 1984.

Gantt, H. L., (ed), *How Scientifw Management Is Applied,* Hive Publishing Company, Easton, P A, 1911.

Gilbreth, F. B. y Gilbreth, L. M., *AppliedMotion Study: A Collection ofPapers on theEfficientMethodto Industrial Preparedness,* Sturgis & Walton Company, Nueva York, 1917. Hax, A. C. y Majluf, N. S., "Organizational Design: A Survey and an Approach", *Operations Research,* 29,3,417-447, 1981. Hayes, R. H., Wheelwright, S. C. y Clark, K. B., *Dynamic Manufacturing: Creating The Learning Organization,* Free Press, Londres, Collier Macmillan, 1988. Lañe, F. C, *Venenan Ships and Shipbuilders ofthe Renaissance,* The John Hopkins Press, Baltimore, 1934. Sadler, P. y Hants, O., *Managerial Leadership in the Post-Industrial Society,* Gower Brookfleld, VT, 1988.

Skinner, W., *Manufacturing, the Formidable Competitive Weapon,* Wiley, Nueva York, 1985. Smith, A., *An Inquiry into the Nature and Causes ofthe Wealth ofNations,* Strahan, and Cadell Printers, Londres, 1776. Starr, M. K., *Global Competitiveness: Getting the U. S. Back on Track,* W. W. Norton, Nueva York, 1988.

Taylor, F. W., *Principies of Scientifw Management,* Harper & Row, Nueva York, 1911.

Taylor, F. W., *Shop Management,* Harper & Row, Nueva York, 1903. U.S. Department of Labor, Bureau of Labor Statistics, Washington, DC, 1982.

CAPÍTULO

2

Sistemas controlados Por el mercado

INTRODUCCIÓN

Las teorías clásicas de administración descritas significaron un incremento constante en los niveles logrados en el proceso industrial durante muchos años. La posición de liderazgo estadounidense y los aspectos de competitividad comenzaron a declinar a mediados de la década de 1960. Sin embargo, tomó algún tiempo darse cuenta de que se requerían distintos enfoques para enfrentar el nuevo ambiente industrial. Este proceso lento y sin coordinación fue llevado a cabo por cada compañía, investigador, consultor y profesional. El cambio ocurrió principalmente en dos lugares: Japón y Estados Unidos. Ahora estos cambios tienden a converger en un solo proceso.

El enfoque japonés sacó a la luz la debilidad de las compañías estadounidenses. Resultó lo más natural que los estadounidenses observaran cómo Japón se había convertido en la potencia industrial líder. Gran cantidad de industriales y profesionales visitaron Japón para estudiar sus sistemas y grandes grupos de consultores japoneses llegaron a las industrias occidentales para ofrecer sus servicios y consejos. Este fenómeno comenzó a principios de los 70, alcanzó su máximo a principios de los 80 y en cierto grado continúa hoy en día. La magnitud de este fenómeno se hace patente con la gran cantidad de términos japoneses que se usan en producción y que se han convertido en parte del lenguaje industrial, por ejemplo *kanban,jidoka,pokayoka* y *kaisen.* Se explicarán estos términos en capítulos posteriores. Tal vez, las traducciones de los libros japoneses sobre temas de producción sean los más populares en esta área. Los viajes de los occidentales a Japón incluyen visitas, a los "maestros" japoneses de distintas industrias, como corte metálico, automotriz (entre las que Toyota es el líder), electrónica y óptica (Matsushita, Sony).

Los estadounidenses reaccionaron al resurgimiento japonés en tres etapas. La primera reacción fue de sorpresa al encontrarse con una industria notoria por su mala calidad que ganaba el mercado a los productos de Estados Unidos. Además, Japón contaba con instalaciones más avanzadas y conceptos de administración de vanguardia. Después vino la admiración. En esta etapa reinó el sentimiento de que Japón podía hacer mejor las cosas y por lo tanto la tendencia fue *imitar* la industria japonesa en lugar de *innovar* lo que se tenía. Recientemente, la industria estadounidense pasó a la tercera etapa, la de la seriedad, o para decirlo mejor, de nuevo al ascenso. Muchos de los éxitos japoneses están basados en tecnología o en técnicas americanas. La tecnología fue transferida a Japón a principios de la década de 1950 como parte del Plan MacArthur. Esas técnicas incluyeron un amplio espectro de temas como métodos y calidad y

fueron promovidas por Deming, Juran y otros. La diferencia estribó en que los profesionales japoneses escucharon e implantaron, y la industria estadounidense ignoró esas ideas. Por las razones que fueran, hoy se puede observar un resurgimiento de la idea de hacer las cosas "a la manera americana", es decir, mediante la innovación y no por imitación. Hubo, en Estados Unidos, una búsqueda esencial para identificar las razones de la decadencia, con el fin de sugerir el remedio y desarrollar técnicas que recuperaran la competitividad en el futuro. En las últimas etapas de esta búsqueda los estadounidenses adaptaron e integraron el enfoque japonés a los sistemas de producción propios tradicionales. Como resultado, individuos y comités generaron una impresionante gama de investigaciones, libros e informes. No existe un consenso en estos resultados en cuanto al motivo por el cual ocurrieron las cosas o a qué debe hacerse en el futuro; sin embargo, lo siguiente expresa una opinión generalizada:

> Las teorías administrativas clásicas existentes (capítulo 1) son inadecuadas para manejar la gran cantidad de problemas del medio ambiente actual y futuro. Existen ciertos conceptos que serán parte de cualquier teoría futura.

Hacemos aquí una vigorosa afirmación al asegurar que es necesario actualizar las teorías y técnicas administrativas que se han usado durante un largo tiempo, más de un siglo en algunos casos. El ambiente para el que fueron creadas se ha transformado totalmente. Por otro lado, las teorías que las sustituyen se encuentran en estado de cambio. Se han propuesto muchas ideas, conceptos y técnicas pero todavía deben convertirse en una teoría unificada sobre la administración de la producción. Algunos conceptos industriales nuevos son una mezcla; algunos son conceptos antiguos que se han afinado al resurgir, algunos son conceptos que remplazan a los anteriores y otros son completamente nuevos. Se integrarán estos conceptos en una plataforma que llamamos la *rueda de la competitividad.* En el resto de este capítulo se analizará esta plataforma, el nuevo ambiente de producción que sirve de fundamento a los sistemas controlados por el mercado y, por último, la manufactura de clase mundial.

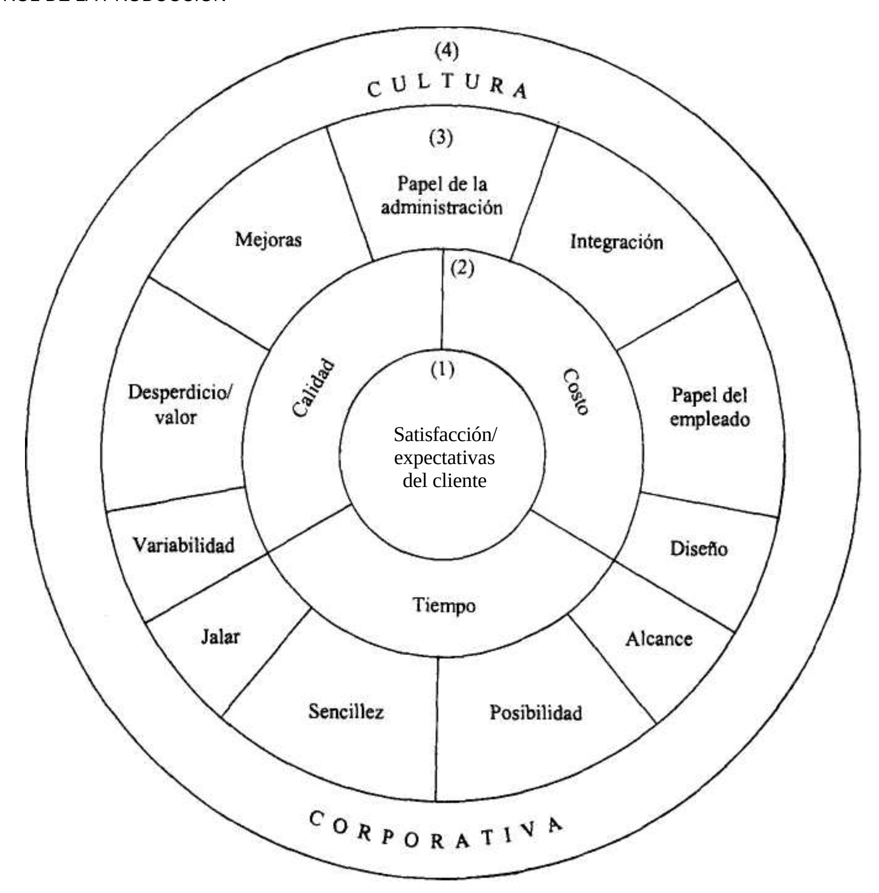
2. LA RUEDA DE LA COMPETITIVIDAD

La rueda de la competitividad, mostrada en la figura 2-1, ilustra algunos de los conceptos requeridos para regresar a la industria estadounidense a su posición de liderazgo.

La rueda tiene cuatro círculos concéntricos; cada uno representa distintos aspectos de la teoría de administración de la producción que está surgiendo. Se definirá brevemente cada círculo y después se hará un análisis más detallado. El **centro** de la rueda es el corazón de todos los sistemas futuros: el **cliente. El círculo de distribución** (círculo 2) muestra lo que los sistemas de producción deben proporcionar al cliente. El **círculo de soporte** (círculo 3) indica los conceptos necesarios para apoyar aquello que proporciona el sistema de producción. El **círculo de impacto** (círculo 4) muestra las consecuencias de esos conceptos en toda la organización.

3. EL CENTRO

No es una coincidencia que el cliente sea el centro de los conceptos del "nuevo mundo industrial". El cliente es el motor que maneja la competitividad. Este concepto en sí no es nuevo; existió en la era de las teorías administrativas "clásicas", pero la importancia, el papel, el alean-



Rueda de la competi tividad

ce y la posición del cliente ha cambiado debido a su creciente refinamiento. La educación, la tecnología, la comunicación y la globalización son todos elementos que han ayudado a crear al nuevo cliente.

Más que operar sólo para responder y cumplir con las necesidades del cliente, las organizaciones deben hacer un esfuerzo para lograr también la satisfacción del cliente. Éste es un término lingüístico sencillo, pero constituye un concepto industrial muy complejo. La satisfacción del cliente comprende muchos elementos: necesidades, calidad, costo, servicio y otros. Incluso el proceso de satisfacer a un cliente en el pasado es totalmente diferente al de hoy. Se da importancia a la satisfacción de las necesidades del cliente **individual** y no las del cliente **promedio** (como con el modelo T de la Ford). Recuerde que los mercados no compran, lo hacen las personas (capítulo 1). Las expectativas del cliente que cambian constantemente aseguran que la satisfacción es un proceso dinámico y cada vez más complejo. Los clientes tienen necesidades que cambian y esperan reacciones flexibles que sólo pueden lograr si la organización se acerca a ellos. El cliente debe convertirse en parte del proceso en lugar de ser su punto terminal. Garantizar la constancia del cliente es ahora más importante que meramente vender un artículo. Los clientes que regresan generan ventas futuras.

En consecuencia, el "nuevo" cliente tiene una opinión que cada vez se toma más en cuenta para manejar una organización, y se han construido nuevos tipos de relaciones entre ambos.

Las expectativas crecientes y cambiantes de los clientes han forzado a la administración a elevar las propias metas en términos de procesos internos. Los fabricantes deben cumplir con las expectativas de los clientes e incluso superarlas.

El alcance del término "cliente" también ha cambiado en forma drástica. Por tradición se veía al cliente como el usuario del producto. En la actualidad se tiene al "cliente interno" cuyas necesidades también deben tomarse en cuenta. Así, manufactura es un cliente de compras, ensamble es un cliente de manufactura o, de manera general, cualquier operación es un cliente de la anterior. Todas las actividades de una organización se pueden ver como un cadena de clientes interconectados. Cada cliente es el proveedor del siguiente cliente en la cadena, y toda la producción y las actividades de negocios están gobernadas por la satisfacción de los clientes.

Si el cliente es el motor que mueve a la organización, las expectativas son la gasolina del motor. La satisfacción del cliente con rendimientos financieros aceptables es la medida del éxito en los negocios (Macbeth, 1989).

SECCIÓN 3 EJERCICIOS

2.1. En los sistemas controlados por la producción los productos satisfacen las necesidades del merca do. En el "nuevo mundo industrial" los productos satisfacen las necesidades de un cliente. Analice la diferencia.

2.2. ¿Cuál es la diferencia entre "cliente interno" y "cliente externo"?

Con el fin de lograr la satisfacción del cliente y cumplir con sus expectativas, todo el negocio tiene que estar a la altura del reto. Cada segmento debe poner su parte y el sistema de manufactura no es distinto. Su papel es entregar un producto de calidad suprema en el tiempo requerido manteniendo el costo tan bajo como sea posible en cada punto de la cadena cliente-proveedor. Estas metas son necesarias pero no suficientes para que una empresa se convierta en líder de su ramo. Con todo lo sencillas que parezcan, es bastante complicado lograr estas metas. Aunque cada meta independiente se puede cumplir, al combinar las tres en un objetivo unificado se obtiene una misión compleja y difícil. La manufactura siempre puede entregar un producto de calidad suprema mediante el retrabajo o la reparación hasta que se logra la calidad deseada, pero el costo se eleva y el tiempo de entrega se alarga. La secuencia apropiada de estas metas es el tema del debate actual. Una proposición es

Calidad -> Tiempo -> Costo

Éste no es un aspecto crucial siempre que se logre el resultado combinado. Sugerimos su disposición en una forma circular, como se muestra en la figura 2-2.

La calidad es un concepto tradicional cuyo significado se ha ampliado y cuya importancia se pone de manifiesto en el sistema de producción moderno. La definición común relacionada con

[1] Esta sección tiene la influencia de Macbeth (1989) (usado con permiso de Springer-Verlag New York, Inc.).

Calidad

Tiempo Costo

Círculo de entrega

el producto es **conformidad con las especificaciones.** Pero para el cliente, la calidad es un asunto más complejo que incluye la percepción individual del valor del dinero, las expectativas del desempeño y la apariencia, el servicio ofrecido antes y después de la venta, y la garantía.

El nuevo enfoque de calidad reconoce todos los aspectos. Desde el punto de vista del producto, una manera de medir la calidad es por el número de productos en un lote de fabricación que no cumplen con las especificaciones, es decir, de productos defectuosos. En el pasado era aceptable cierto nivel de esta medida. Hoy se quiere llegar a la perfección -y no permitir defectos. Para dar una mejor perspectiva de este cambio, no hace mucho se consideraba buena calidad obtener 3 productos defectuosos en 100 unidades. Hoy, algunas industrias, en especial la electrónica, considera que más de 100 *partes por millón* (PPM) defectuosas es una calidad pobre. Esta nueva actitud representa un gran salto hacia la perfección y al tipo de calidad de producto que un sistema de manufactura necesita entregar.

Pero la calidad incluye más que calidad del producto. Toda la producción, el apoyo (compras, contabilidad, etc.), ingeniería, investigación y desarrollo, y las actividades de servicio tienen que tener la conciencia de calidad. Deben estar atentos de las decisiones que afectan la calidad en toda la cadena de producción, para proveedores y clientes tanto internos como externos. Entonces, la calidad es un concepto global, y cada elemento en el sistema de producción lucha por alcanzar la perfección. La calidad no tiene un "estándar"; es un blanco que se mueve. En el pasado la calidad estaba controlada por los expertos, hoy el cliente la controla. Proporciona un fundamento sólido para todas las actividades de una organización. Al contrario de la creencia de que una mayor calidad significa un mayor costo, en el nuevo mundo industrial, el mejoramiento de la calidad reduce el costo. La IBM es un ejemplo que confirma este punto. En 1990 adoptaron una estrategia de calidad controlada por el mercado (CCM). La esencia de esta estrategia está representada en la declaración de J. F. Akers, directivo de IBM en ese momento.

> La calidad controlada por el mercado comienza al hacer de la satisfacción del cliente una obsesión y al dar poder y responsabilidad a nuestra gente para usar su energía creativa con el fin de satisfacer y deleitar a su cliente. Significa que nuestras metas y objetivos de calidad deben depurarse en toda la compañía de manera que cada persona conozca cuál es su responsabilidad, y conozca también que serán medidos según ésta.

El tiempo no es en sí un concepto nuevo; siempre ha estado ahí. El tiempo, además, tiene múltiples significados. Tiene un significado "puntual" (¿qué hora es?), una connotación de "longitud" (¿cuánto tiempo toma?) y una interpretación de "puntualidad" (¡llega a tiempo!), sin men-

cionar los significados menos científicos y más cualitativos, como buen tiempo, tiempos interesantes, etcétera. En los sistemas de producción se ve el tiempo como dos entidades distintas pero relacionadas: el tiempo como una medida de longitud y el tiempo como la indicación de una meta.

El tiempo de entrega es el periodo necesario para entregar un producto desde que se ordenó hasta que lo recibe el cliente. La fecha de entrega es una meta, que representa ya sea la fecha en que el producto se necesita o la fecha en que se prometió entregarlo. Si se puede acortar el tiempo de entrega, se pueden prometer fechas más próximas y viceversa. Si el cliente necesita un tiempo de entrega más corto, debe encontrarse una manera de acortar el tiempo de entrega, tomando en cuenta que un tiempo más corto puede afectar todas las componentes de la cadena proveedor-cliente. Se puede acortar el tiempo de entrega de la materia prima o bien se pueden reducir las operaciones (es decir, su duración), el tiempo de preparación o disminuir el tiempo en algún otro punto.

La disminución del tiempo adquiere cada vez más importancia en el nuevo mundo industrial debido a que el tiempo es un elemento primordial en la satisfacción del cliente. Se hace referencia aquí a todos los clientes, internos y externos, en términos tanto del tiempo de entrega como de la fecha de entrega. En el pasado, eventualmente se hacía la entrega. Hoy la entrega es la fuerza que controla todo el sistema para asegurar la satisfacción de todos los clientes.

En el mercado actual, el concepto de tiempo está asociado con el de confiabilidad o consistencia. No es suficiente acortar el tiempo de entrega y entregar a tiempo una vez. Se debe poder hacerlo repetidamente, es decir, reducir a cero la variabilidad en el tiempo. Aún más, para superar las expectativas del cliente, es necesario seguir mejorando el tiempo y la puntualidad en la entrega.

El tiempo afecta no sólo al sistema de producción, sino a toda la empresa. El tiempo para comercializar y el momento en que ocurre son particularmente cruciales en el desarrollo de nuevos productos. El tiempo para comercializar es el tiempo que transcurre desde la concepción de un producto hasta que llega al mercado. Este periodo debe reducirse lo más que se pueda para que se introduzca al mercado en un buen momento. La industria automotriz en Estados Unidos tiene un tiempo de introducción de automóviles nuevos de alrededor de 5 años (redujeron el de 7 años) contra 3 para los modelos japoneses —¡un largo camino por andar!—. Toda la cadena proveedor-cliente, incluyendo producción, debe participar en la disminución del tiempo de introducción. Una respuesta rápida creará la competitividad. Si se clasificó la década de los 80 como la de la competencia basada en la calidad, la de los 90 agrega la competencia basada en el tiempo.

4.3 Costo

El costo es un término común pero tiene varios significados según las situaciones. Aunque el precio de un producto es un "costo" para el cliente, no es la suma del costo de todas las actividades asociadas con su generación. El precio del producto debe reflejar la ganancia que la compañía pretende obtener por arriba del costo. Así, el costo y el precio son dos conceptos separados. Para nuestros propósitos, el costo se define como *una medida del uso de recursos,* y se expresa en las mismas unidades usadas en ese negocio. Entonces el costo es una medida interna y, al menos conceptualmente, se pueden controlar sus componentes. El precio, sin embargo, es cuestión de política y se ve afectado por el margen de utilidades que se desea, la competencia en el mercado, la política de productos y más. El precio es de interés para el cliente externo,

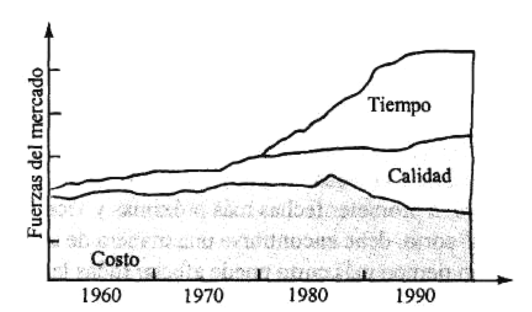


FIGURA 2-3
Evolución de costo, calidad y tiempo (adaptado de una presentación de IBM)

quien no se preocupa por el costo para la empresa (el costo interno). Por el contrario, la calidad y el tiempo son de gran interés para el cliente. La política de precios no está totalmente separada del costo. Si el costo es menor, se tiene más flexibilidad en el mercado para.variar la política de precios con el fin de mejorar la posición competitiva.

El papel que juega el costo ha cambiado. Por tradición, el costo ha sido la medida dominante de las compañías al hacer las corridas del sistema de producción, lo cual no es sorprendente; una alta proporción de los bienes de la empresa están ligados a la manufactura. La mayor responsabilidad de la administración de la producción solía ser el **control de costos.** Ese papel todavía existe, pero otra responsabilidad mayor, la de **reducción de costos,** adquiere cada vez más importancia. Para lograr una reducción de costos deben identificarse las causas de costos innecesarios, como exceso de inventario, y eliminarlas. El cambio se ha dado del **control de costos** al **control de causas,** donde el costo es una medida conveniente usada para la reducción.

La reducción de costos es una característica clave en el mundo industrial moderno. Para ser competitivos, el costo puede seguir sólo una tendencia: hacia abajo. El mejoramiento en costos requerido es de *varios órdenes de magnitud,* no pequeños porcentajes. El costo, que no tiene insumo, se ha convertido en el resultado de las acciones.

4.4 Conclusiones

Las tres metas de calidad, tiempo y costo no surgieron y ganaron importancia al mismo tiempo. La figura 2-3 muestra la evolución de las tres. El costo siempre se ha considerado de una manera u otra. A fines de los 70 la calidad comenzó a tener mayor importancia, y continuará haciéndolo en la década de los 90. La combinación de calidad, tiempo y costo es la clave de la competitividad en el nuevo mundo industrial.

SECCIÓN 4 EJERCICIOS

2.3. ¿Cuál es la diferencia entre la calidad relacionada con el producto y la percepción de la calidad por parte del cliente?

2.4. ¿Cuál es el nuevo alcance de la calidad?

2.5. Analice el pensamiento detrás de la frase "la calidad es un blanco que se mueve".
2.6. Analice las dos componentes del tiempo relacionadas con la producción, el tiempo de ciclo y la fe cha de entrega.
2.7. Repita el ejercicio 2.6 para el tiempo de preparación y el tiempo de inicio de la producción.
2.8. Repita el ejercicio 2.6 para el tiempo de respuesta y el tiempo de introducción.
2.9. Una compañía está desarrollando un nuevo producto. Estima que su tiempo de introducción es 12 meses. Se da cuenta de que si el desarrollo se retrasa tres meses, perderán el momento. Explique.
2.10. ¿Cuál es la diferencia entre el costo y el precio?
2.11. ¿Existe una relación entre control de costos, reducción de costos y control de causas? Explique.

5 EL CÍRCULO DE SOPORTE

Se ha establecido la dificultad de combinar las metas del sistema de manufactura (calidad, tiempo y costo) en una meta común. Como era de esperarse, recientemente se han sugerido muchas formas de lograr esta meta mayor. Cada sugerencia o combinación de sugerencias representa cierto concepto.

No existe un consenso sobre los conceptos, sin hablar de la importancia relativa de cada uno. Pero esto no debe ser un impedimento. La lista de los principales conceptos nuevos se muestra en el círculo de soporte de la figura 2-1. La localización en el círculo, el tamaño del segmento y su relación con el círculo de distribución no son significativos. Estos conceptos se estudiarán en orden lógico. Cualquier orden sirve, siempre que se entienda el significado, importancia y contribución de cada elemento. Se reitera que algunos conceptos son antiguos pero pueden tener un nuevo significado. Otros son completamente nuevos. Cada uno de ellos tiene herramientas y técnicas para su implantación. Algunas de estas herramientas se estudian en otras secciones del libro.

5.1 Alcance

El alcance de un negocio se ha redefinido para que incluya por un lado al cliente y por el otro al proveedor externo, que representa un contraste directo con el pasado, cuando el cliente estaba "allá afuera" y se consideraba al proveedor más un adversario que un socio. Ya se han identificado los conceptos de un consumidor que se convierte en prosumidor. La misma relación se desarrolla en el lado del proveedor; ahora se le incluye como un miembro del equipo, con la intención de tener una asociación permanente. Esta política reduce en gran parte el número de proveedores. La Xerox Corporation, por ejemplo, redujo su base de proveedores de 4500 a 400. Los negocios ya no tratan de generar una guerra de precios entre proveedores. El precio es importante, pero lo es más la calidad y la consistencia de la entrega. Conforme un proveedor externo se convierte en parte del equipo, la relación productor-proveedor cambia. No sólo se espera que un producto se entregue según las especificaciones, también se confía en que el proveedor nos diga si las expectativas de calidad son suficientemente altas o se pueden incrementar. Partiendo de un sistema proveedor, cliente y consumidor como tres entidades separadas, se integran las tres como se muestra en la figura 2.4. Esta inclusión de todos los involucrados con el producto es la filosofía básica de la administración de la cadena de proveedores.

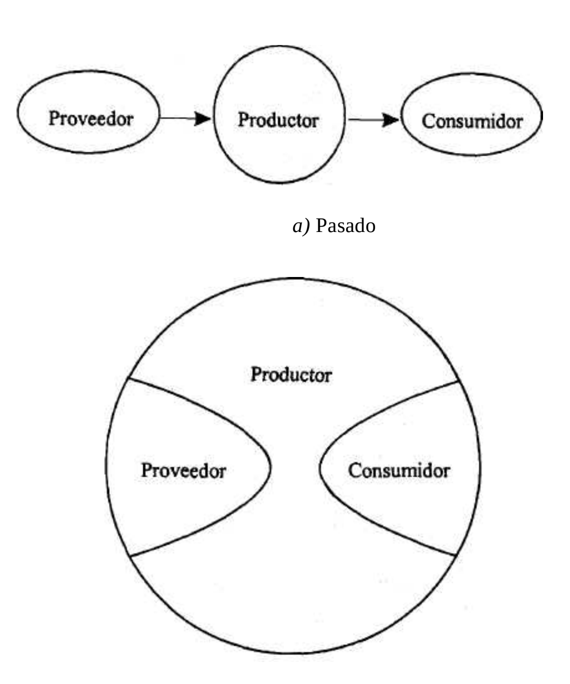


FIGURA 2-4
Relación proveedor-productor-consumidor

5.2 Integración

La integración se usa en muchos contextos: técnicos, organizacionales, de comportamiento y más. Se puede usar para analizar un concepto o una técnica; en consecuencia, hay confusión. Se considerará la integración como el proceso de ver un sistema y no una componente; dicho de otra manera, el proceso de buscar la optimización global en lugar de la local. Se habla de optimización no como en su significado matemático sino en el sentido de obtener buenos resultados. Ambas definiciones implican el reconocimiento de la importancia de la interacción entre las componentes de la organización industrial. Examinar cada componente por separado, como se hacía en el pasado, ya no sirve. El concepto de alcance que se analizó representa una forma de integración en la cual tanto el proveedor como el consumidor se incluyen en el sistema. Otros ejemplos ayudarán a aclarar este concepto.

El diseño del producto y el diseño del proceso se hacía en forma independiente. Lo que parecía ser un producto perfecto en el papel resultaba una pesadilla en términos del proceso de manufactura, por lo que se tenían costos de producción en extremo altos. Hoy, esos dos procesos están integrados, y el cliente (a través de la función de mercadotecnia) también está incluido. Al diseñar un producto, los diseñadores toman en cuenta aspectos de fabricación y verifican con las personas de comercialización los cambios posibles en las especificaciones. Esta integración de procesos logra las metas de reducir costo y tiempo y aumentar la calidad. Se optimiza el diseño del producto desde una perspectiva global y no sólo desde el punto de vista del

diseñador. Otro ejemplo de integración se encuentra en el concepto de calidad total. En contraste con dar importancia sólo a la calidad del producto, ahora se integran todas las actividades para lograr la calidad total.

Existen otros aspectos de integración además de quitar las barreras dentro de una organización. En la planta de producción, en lugar de tener grupos de máquinas del mismo tipo (diseño funcional) que se usan para fabricar todo tipo de productos, se "integra" cierto número de máquinas diferentes para producir un grupo de productos similares. Esto facilita el proceso de manufactura, y se tiene de nuevo optimización global y no local, donde la integración se hace en términos del equipo.

La integración de la información ocurre también debido a que se integra toda la tecnología de información requerida para diseñar, íabricar y entregar el producto. La información se mueve directamente entre las distintas componentes de la empresa y está disponible para diferentes usuarios según lo requieran.

El concepto de integración con frecuencia se asocia, erróneamente, con el advenimiento de las computadoras. La integración es un concepto autónomo que se puede aplicar sin una computadora, algunas veces necesita sólo la simple comunicación entre la gente. La importancia de la computadora está en aumentar la rapidez, el esfuerzo y la profundidad de la integración de la información.

5.3 Flexibilidad

Al estudiar el centro, se mencionó que los clientes tienen necesidades cambiantes y esperan reacciones flexibles. Esas necesidades variables crean la fluctuación en la demanda, una variedad más grande de productos y nuevos productos. Para seguir en la competencia, los sistemas de producción deben diseñarse para complacer al mereado cambiante. La flexibilidad requiere que el sistema de producción pueda diseñar con rapidez un nuevo producto e introducirlo al mercado, satisfacer los patrones cambiantes de volumen de producto requerido, y proveer una mejor mezcla de productos. En cada caso el sistema de producción debe ser capaz de realizar esas tareas en el contexto de una meta unificada de calidad, tiempo y costo. La flexibilidad da la mayor importancia a la rapidez con que se realiza cada tarea. Esta difícil misión obliga a un cambio en muchas costumbres de la planta. Es evidente que no es sencillo ni barato adaptar la línea de producción en masa a los cambios en la mezcla de productos. Recuerde que en el capítulo 1 se aseguró que la era de la producción en masa estaba pasando, y una de las razones es la necesidad de flexibilidad. En el caso extremo, la flexibilidad se logra cuando el sistema de producción puede fabricar un solo artículo y de todas formas hacerlo a un costo bajo.

La implantación de la flexibilidad causó cambios drásticos en la organización y en la planta. El tiempo necesario para cambiar una instalación de producción de un producto a otro se ha comprimido de horas a minutos; el tiempo de introducción de un nuevo producto se ha acortado de años a meses; las instalaciones de producción flexible pueden fabricar al mismo tiempo muchos productos distintos.

La manufactura flexible está sustituyendo al concepto de producción en masa del pasado. Ahora es un concepto clave para lograr la competitividad. Algunas compañías hacen de la flexibilidad una meta primordial en su estrategia de fabricación.

5.4 Diseño

El diseño ha sufrido un cambio completo. Aceptamos la creencia de que la parte más importante del costo y la calidad del producto están determinados en la etapa de diseño. Si ha de proporcionarse al cliente más variedad más rápido y a menor costo, es imposible usar el mismo enfoque de diseño que se usaba en el pasado. El diseño y el desarrollo del producto ya no son elementos aislados. El diseño ahora interactúa con los clientes y con la producción, y escucha a los expertos de otros segmentos del negocio. Esta integración, basada en el enfoque de equipo, ayuda a conseguir un diseño que toma en cuenta la función (especificaciones), la vida (confiabilidad), la forma (estética) y la manufactura eficiente. Aunque por lo general el diseño ha sido un esfuerzo de equipo, la composición del equipo y su alcance han cambiado.

5.5 Sencillez

En los inicios de la era industrial, la sencillez no era una prioridad porque las cosas eran simples por naturaleza. En el nuevo ambiente de la manufactura se simplifica por dos razones importantes:

- Las personas entienden mejor las cosas sencillas.
- Las situaciones sencillas nos permiten usar soluciones simples que son menos costosas, consumen menos tiempo, se implantan más rápido y tienen menor riesgo.

El nuevo ambiente de producción es complejo por naturaleza. Se tiene la tecnología, como la computadora y sus derivados, para manejar las situaciones complejas. Es tentador ir directo hacia la tecnología de punta para resolver el problema complejo. Sin embargo, antes de implantar una solución a un problema complejo, intente simplificarlo para poder darle una solución menos costosa. Por ejemplo, en la automatización o computarización, una parte sustancial de los beneficios (en ocasiones hasta el 80%) se logra antes de instalar la automatización. En algunos casos este nivel de beneficios puede ser suficiente y serán más efectivos los costos. El mismo razonamiento se aplica a la simplificación de otros aspectos de la manufactura, como el diseño de producto y proceso, control, información, etcétera. Aunque esta sencillez era necesaria en la era industrial anterior, hoy el concepto es aun más importante. No debe tenerse prisa en usar la tecnología avanzada para "manejar la complejidad" a menos que sea una necesidad real.

5.6 Variabilidad

La variabilidad ha sido un problema desde que la sociedad cambió de la artesanía a la era industrial. Todo varía, productos, dimensiones, procesos de manufactura, tiempo de entrega y niveles de calidad. La variabilidad, un enemigo universal, se acepta por tradición como un hecho de la vida. Se ha intentado definirla y usar métodos estadísticos para controlarla o trabajar con ella. Ahora se intenta eliminarla por completo, reduciendo la necesidad de un buen número de herramientas desarrolladas para controlarla. Observe que este enfoque está de acuerdo con los conceptos de sencillez y perfección introducidos antes.

Es evidente que la consistencia del desempeño o la reducción de la variabilidad pueden dar grandes beneficios. Esta idea no se ignoraba; no obstante, hoy se tiene la tecnología para implantar este concepto. Por ejemplo, las nuevas máquinas herramienta pueden tener procesos

que tienen una variabilidad cercana a cero. Estos procesos se conocen como manufactura determinística. En el caso del hardware, la baja variabilidad es una característica técnica dada de la máquina. En otros casos es necesario un gran esfuerzo para lograrlo.

5.7 Jalar *(pulí)*

El proceso de producción es básicamente un proceso de flujo. Primero se tiene un flujo físico: la materia prima, que es el producto semiterminado, se mueve de una estación de trabajo o de ensamble a otra. En cada una se hace algún procesamiento a la materia prima y los materiales se mueven a la siguiente estación en la secuencia de manufactura. Otros tipos de flujo no son físicos, el más importante es el flujo de información. Éste puede ser verbal, en el papel, en una pantalla de computadora o una combinación de éstos.

El flujo físico es la columna vertebral del sistema; sin él no hay salida del sistema de producción. Así, se quiere mantener un flujo suave del producto en la línea, sin retrasos. Observe que el hecho de que una estación de trabajo detenga su procesamiento no se ve como un retraso, sino que es parte del proceso de producción.

Es posible comparar el flujo de producción con otros tipos de flujos, por ejemplo, los flujos de la naturaleza. Considere los ríos, en donde la ley natural de la gravedad dicta que el flujo va de lugares altos a lugares bajos. En contraste, el flujo de producción tiene reglas hechas por el hombre que lo gobiernan en lugar de las leyes de la naturaleza. Por tradición, la ley que gobernaba era la de la **producción empujar *(push):* sigue trabajando sin importar qué pase más adelante en la línea —haz según el plan**—. La información fluye como la corriente, igual que el flujo físico, como se muestra en la figura 2-5«). Esta regla funcionó para los sistemas controlados por la producción en los que se tenía el mercado (consumidor) garantizado. Aún más, la producción "río arriba" era insensible a lo que pasaba más adelante. En el caso de la descompostura de una máquina o de un retraso, "río arriba" seguía produciendo (el fenómeno del aprendiz de brujo). El resultado era el congestionamiento en la planta de producción y una obstrucción del flujo.

Las cosas cambiaron con los sistemas controlados por el mercado en los que el cliente es el "corazón". La ley que gobierna ha cambiado a la regla de **jalar** o **producción jala.** La esencia del sistema de producción jalar es **hacer las cosas al principio del flujo solamente cuando se piden al final de éste.** El punto terminal es el cliente. En un sistema de producción empujando, los flujos físicos y de información van en la misma dirección. En el sistema de producción jalando el flujo físico y el de información van en direcciones opuestas, como se muestra en la figura 2-56). En el sistema de producción jalar nada comienza en la cadena proveedor-cliente a

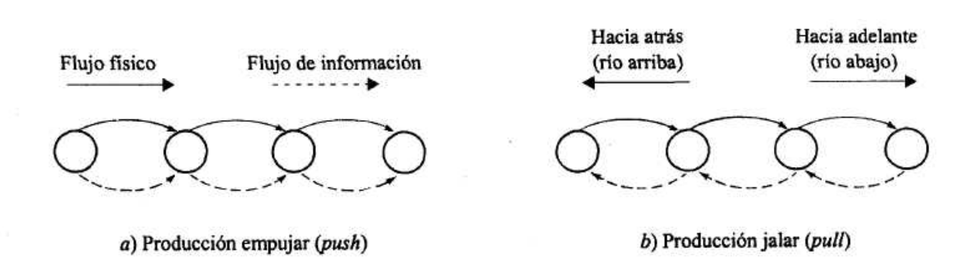


FIGURA 2-5
Producción empujar y jalar

menos que haya una petición (información) desde el final de las actividades. Este concepto se aplica no sólo a las actividades de la planta y a los flujos sino también al proveedor externo y al cliente.

No es sencillo poner en práctica el concepto de jalar. Se requiere una gran cantidad de preparación y varias técnicas necesarias para una implantación exitosa. En el ambiente dinámico de los sistemas controlados por el mercado, es un concepto poderoso.

5.8 Desperdicio/valor

En la vida diaria con frecuencia recibimos el consejo de no "desperdiciar" recursos, como nuestro tiempo y dinero. Al reflexionar vemos que en realidad se nos aconseja no usar un importante recurso (es decir, tiempo y dinero) si no ganamos algún **valor.** Como la misión principal de un proceso productivo es incrementar el valor para el consumidor final, este principio sencillo se convierte en un concepto importante en los sistemas de producción. El cliente está dispuesto a pagar por el valor, no por el desperdicio.

En el contexto del proceso de manufactura, el **desperdicio** se define como cualquier recurso gastado en exceso de lo requerido y lo valorado por el cliente. Aunque no siempre es fácil determinar la mínima cantidad de recurso necesaria, algunas veces el desperdicio es obvio. El cliente espera una calidad perfecta en el producto; esto se puede lograr "haciéndolo bien la primera vez" (un principio importante en sí mismo) o mediante el retrabajo hasta que se logra la calidad deseada. Desde el punto de vista del cliente el valor se debe obtener "en una pasada", y el retrabajo adicional y su correspondiente costo son desperdicio. Este ejemplo representa una medida de desperdicio —en términos del costo—. La reducción o eliminación del desperdicio significa reducir el costo, lo cual tiene una correlación directa con una de las metas primordiales del sistema de producción.

En general el desperdicio ocurre en tres aspectos: tiempo, dinero y esfuerzo. El tiempo y el esfuerzo se pueden expresar mediante un costo equivalente. El tiempo de entrega excesivo o la mala calidad son desperdicio, como lo son un diseño de producto con demasiada ingeniería, el exceso de inventario y los gastos generales inflados. Cualquier otra actividad cuya contribución al valor del producto (y la satisfacción del cliente) sea cuestionable será también desperdicio.

Las actividades de producción se clasifican en dos grandes categorías: las que agregan valor y las que agregan costo. Las **actividades que agregan valor** son aquellas que por su naturaleza se supone que aumentan el valor del producto. Ejemplos característicos son las actividades de conversión en las que la materia prima o comprada se transforma del estado en que se recibe, en un producto terminado. En este caso el desperdicio sería el uso excesivo de recursos. Las **actividades que agregan costo** son las que permiten una operación más tranquila o hacen la vida más sencilla en el sistema de producción. Apoyan un proceso de conversión, y aunque pueden ser importantes e incluso necesarias, no agregan valor; por ejemplo, el manejo de materiales. Un tercer tipo de actividades híbridas cae entre las que agregan valor y las que agregan costo; por ejemplo, el control de calidad.

La reducción del desperdicio debe tener un enfoque distinto para cada tipo de actividad. Para las actividades que agregan valor es apropiado **optimizar** recursos. Para las que agregan costo, es adecuado **eliminar** costos. El desperdicio siempre ha existido en los sistemas de producción; su definición y reconocimiento llevan a encontrar maneras de reducirlo.

5.9 Mejora

El concepto de mejora se ha usado en los sistemas de producción desde los días de Taylor y los Gilbreth. En un principio se intentaron mejoras a nivel de las tareas, básicamente a través del estudio de tiempos y movimientos (capítulo 1). Al pasar los años, el concepto de mejora se ha extendido y su alcance incluye mejoras en áreas adicionales de manufactura (procesos, ensamble, calidad, tiempo y costo). Hasta ahora, la base del enfoque de mejoras incluía estas tres características:

- Debe hacerse un trueque: si se quiere una mayor calidad, se tiene que pagar más por ella. El punto de vista era local y no global: reducir el costo de una actividad y no el costo total del sistema.
- Por lo común, las mejoras se llevaban a cabo en forma de proyecto (actividad según nece sidades) para mejorar la calidad o reducir el inventario.

La situación actual de mercados competitivos ha hecho que el importante concepto de mejora sea vital. Para satisfacer a los clientes debemos proporcionar un buen producto hoy, pero también debemos mostrar que se hacen esfuerzos por tener un mejor producto en el futuro. Entonces, el "nuevo" proceso de mejora se basa en las siguientes dos ideas:

- **Mejora integral:** el proceso de mejora es un proceso multidimensional. No se puede lo grar una meta a expensas de otra. La meta del sistema de producción tiene que mejorarse en cada una de tres dimensiones: calidad, tiempo y costo. Se debe proporcionar una mayor calidad a un precio menor y con tiempo de entrega reducido, lo que significa que se tiene que tomar un enfoque global y no local para asegurar la mejora de todo el sistema. **Mejora continua:** la mejora debe ser un proceso continuo; siempre existe un espacio para las mejoras futuras. Una mejora lleva a otra, lo que establece un proceso cíclico.

En ocasiones, este proceso recibe el nombre de *kaizen,* término japonés para la mejora continua. Los japoneses hacen hincapié en que el *kaizen,* practicado en Japón durante años, es un proceso que incluye a todos, desde la alta administración hasta el último empleado. También hacen una distinción sutil entre *kaizen* e innovación. *Kaizen* significa pequeñas mejoras hechas con las cosas como están y es el resultado de un esfuerzo constante. La innovación incluye un mejoramiento drástico a lo que se tiene y es el resultado de una inversión fuerte en nueva tecnología o equipo.

El mayor enemigo de la mejora es la complacencia. En el capítulo 1 se vio el costo que la industria estadounidense ha tenido que pagar por ser complaciente. El concepto de mejora es válido no sólo para las metas globales unificadas, sino en todo el sistema de manufactura en todos los niveles. Las mejoras en las metas se pueden lograr sólo a través de una serie de pequeñas mejoras, con la adhesión constante a los principios de integración y continuidad citados antes.

5.10 Papel de la administración

Debido a que el elemento humano es el recurso más importante que posee una compañía, es de esperarse que los dos últimos conceptos que se analizarán tengan que ver con las personas. La administración y los empleados se encuentran en los extremos opuestos del espectro. La *admi-*

nistración tiene un papel más amplio en los nuevos sistemas de producción. Transforma el sistema de su modo actual en nuevo modo de operar representado por los conceptos descritos hasta ahora. El administrador está a cargo, básicamente, de un proceso de cambio cuya introducción es difícil porque intervienen las personas en el sistema. El cambio representa un reto para cada trabajador porque sus habilidades pueden quedar obsoletas, su nivel puede degradarse, el ambiente o la localización del trabajo pueden cambiar o, todavía peor, el trabajo puede eliminarse. El papel del administrador es facilitar el cambio positivamente siguiendo tres principios:

Compromiso: el administrador debe, antes que nada, demostrar un compromiso con los nuevos conceptos, que puede ser un rompimiento completo con el estado actual. **Participación:** la administración debe convertirse en **parte del proceso** y no quedarse fuera de él. El cambio comienza en el nivel más alto, y la administración debe apoyar y experimentar los elementos del proceso de cambio en toda la organización. • **Metas:** la administración debe establecer **metas extraordinarias.** Sólo así será posible obtener resultados de primer orden. En calidad, por ejemplo, la meta es la perfección sin un nivel "aceptable" de defectos.

Por lo general, los cambios drásticos no se introducen voluntariamente. Con frecuencia alguna amenaza externa severa contra la supervivencia hace que el cambio sea necesario. La Harley Davidson Company es un ejemplo bien conocido de cambio por supervivencia. Los estudios (Hayes *et al.,* 1988) muestran que la administración puede tener 50 a 100% del impacto sobre el desempeño en la manufactura. La conclusión es que *la administración marca la diferencia.*

5.11 Papel del empleado

Los empleados siempre han sido parte de la organización, pero ahora deben convertirse en parte del proceso de cambio y del modo de operar. En este contexto la administración establece dos metas para los empleados: participación y desarrollo.

La participación de los empleados utiliza la energía creativa de todos ellos para resolver problemas (Huge y Anderson, 1985). Requiere un alto grado de compromiso con la compañía. Esta participación toma muchas formas, pero la idea básica es que si los empleados están involucrados en el proceso, aceptan los resultados con más facilidad. Además, la empresa utiliza una gran cantidad de inteligencia para generar buenas ideas.

Muchos sistemas de producción nuevos tienen nuevas tecnologías como parte de ellos: nuevas máquinas, procesos, computadoras y tecnologías de administración. Debe llevarse a cabo una buena preparación dentro de la organización respecto a estas nuevas tecnologías. El desarrollo del empleado (Hayes *et al,* 1988), la actualización de las habilidades, es necesaria para la utilización de las nuevas tecnologías. Este sistema cambia la filosofía tradicional de control de empleados en un nuevo concepto de empleado comprometido y actualizado.

SECCIÓN 5 EJERCICIOS

2.12. ¿Cuál es la importancia de aumentar el alcance de un negocio?
2.13. Haga una comparación entre la integración física y la integración de información.

2.14. ¿Son sinónimos la flexibilidad y la reducción del tiempo? Explique.

2.15. En el lenguaje común del diseño se usa el vocablo KISS, por las iniciales de la frase *"Keep it simple, stupid"*, que significa: "Manténlo sencillo, estúpido". Explique la idea detrás de esto.

2.16. Dos compañías entregan el mismo producto una y otra vez. La compañía A entrega, en promedio, a tiempo pero con alta variabilidad. La compañía B entrega consistentemente 5 días tarde. ¿Cuál de las dos situaciones es preferible y por qué?

2.17. Considere los siguientes tres "escenarios de solución":

a) Una solución compleja para un problema complejo
b) Una solución compleja para un problema sencillo
c) Una solución sencilla para un problema complejo

Dé un ejemplo para cada una de las situaciones anteriores. Analice si en el ejemplo que dio en *a)* y *b)* se puede simplificar la situación.

2.18. Para planear la producción se usa un parámetro llamado tiempo de entrega, que es el tiempo estimado entre el inicio y la terminación de la producción. El tiempo real entre el inicio y la terminación de la producción puede ser igual o diferente al tiempo de entrega debido a que hay colas u otros retrasos en la planta. Este tiempo real se llama tiempo de ciclo. Considere dos procesos de producción distintos. Ambos tienen un tiempo de entrega de 5; sin embargo, el tiempo de ciclo sigue una distribución normal. Para el primer proceso se tiene $N(5,4)$ y para el segundo $N(5,1)$. Analice esta situación y dé sus conclusiones.

2.19. Considere el producto 1 de la figura 1-4, que representa una línea de producción con cuatro estaciones de trabajo. Suponga que la línea puede producir 400 unidades por semana. En un mes dado, el plan de producción era fabricar 600 unidades. La demanda real por semana durante ese mes fue la siguiente:

Semana	12		3	4
Demanda	100	0	350	150

Evalúe el nivel del inventario de artículos terminados al final de cada semana para la producción jalar o empujar.

2.20. Identifique si cada uno de los siguientes elementos es o no desperdicio. Explique.

- Tiempo de espera en un aeropuerto
- Dos llantas de refacción en un automóvil
- Tiempo de vuelo
- Un automóvil "color limón"

2.21. Identifique si cada una de las siguientes actividades agrega valor o agrega costo. Explique.

- Preparación
- Horneado de pan
- Envío
- Empaque
- Tratamiento con calor
- Almacenamiento de materiales

2.22. La calidad, en especial para las componentes electrónicas, se mide en partes por millón (ppm), es decir, el número de componentes defectuosas por millón producido. Un fabricante de este tipo tiene un nivel de calidad de 1000 ppm. Identifique cada uno de los siguientes objetivos como mejora o innovación. Explique.

a) Mejora en la calidad a 100 ppm al año.
b) Mejora en la calidad de 15% anual.
c) Lograr 100 ppm en tres años y 10 ppm en cinco años.
d) Lograr 100 ppm en tres años y después 10% de mejora cada año.

6 EL CIRCULO DE IMPACTO

Los conceptos descritos en la sección 5 tienen un gran impacto en una organización industrial que adopta todos o algunos de ellos. En última instancia, este impacto está representado por un cambio de cultura importante en la organización

¿Qué es la cultura organizacional? Cultura se refiere a los valores, creencias y principios esenciales que sirven como fundamento a un sistema administrativo. También incluye un conjunto de prácticas y comportamiento administrativos que sirven de ejemplo y a la vez refuerzan esos principios básicos (Schoenberger, 1986). Por ejemplo, la cultura organizacional de IBM incluye el siguiente conjunto de creencias:

Respeto por el individuo
- El mejor servicio a clientes en el mundo
- La búsqueda de la excelencia

No es difícil observar el cambio que estos conceptos adquieren en algunas componentes de la cultura organizacional. El resultado neto de este cambio es que la cultura organizacional cambia de la búsqueda de la eficiencia a la búsqueda de la efectividad, que contiene un espectro más amplio.

La eficiencia, una medida local del desempeño, se define como el cociente de la salida entre la entrada. La idea es hacer las cosas bien.

La efectividad, por otro lado, se enfoca en los requerimientos del todo el sistema, no en subconjuntos del mismo. La idea es hacer las cosas correctamente. Se especifican los estándares de desempeño para los principales parámetros del sistema, y éstos se convierten en el marco de referencia dentro del cual las medidas de eficiencia siguen teniendo un papel importante (Macbeth, 1989).

La utilización de máquinas, el porcentaje de tiempo que la máquina está operando y produciendo artículos, es una **medida de eficiencia.** Una máquina con 30% de eficiencia parece que realiza un trabajo pobre, mientras que una máquina con 90% de eficiencia está produciendo casi todo el tiempo. Sin embargo, este análisis no considera la **efectividad** del asunto —en este caso, si el producto tiene una demanda real—. Si los clientes nada más están dispuestos a comprar 30% de la capacidad de la máquina, operarla con 90% de eficiencia sólo creará productos para el inventario.

La transición de una cultura de eficiencia a una cultura de efectividad es complicada. Por lo general lleva varios años lograrlo debido a que toda la organización tiene que transformarse. Adoptar los conceptos del nuevo mundo industrial es un compromiso por largo tiempo; tomar un atajo para acortarlo significará el fracaso.

SECCIÓN 6 EJERCICIOS

2.23. ¿Es posible ser eficiente pero no efectivo? Explique y dé un ejemplo.
2.24. ¿Es posible ser efectivo pero no eficiente? Explique y dé un ejemplo.

7 OBJETIVO DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

El objetivo más importante de un sistema de producción es lograr la máxima contribución a la **continuamente creciente** satisfacción del cliente. Otras áreas de la organización contribuyen con su parte, pero el sistema de producción es el pivote de este esfuerzo. Es el único lugar donde las ideas y el material se transforman en un producto que se entrega al cliente. Casi siempre, el objetivo de un sistema se define como punto de partida para el estudio. En este caso, esperamos hasta que el lector estuviera listo para apreciar este objetivo.

Un derivado de este objetivo primordial son las metas operativas de los sistemas de producción: entregar un producto de calidad suprema, a tiempo cada vez y al menor costo posible, o en resumen, calidad, tiempo y costo combinados. Esto es:

Calidad (mejorada)
Tiempo (a tiempo todas las veces)
Costo (simultáneamente) disminuido
Combinación

Éstas son metas relativamente sencillas de establecer pero difíciles de cumplir. Una organización que pueda lograrlas está en camino de convertirse en un fabricante de clase mundial (FCM). Antes de estudiar la fabricación de clase mundial, se ilustrarán varios aspectos de la producción integrada y se relacionarán con los conceptos de la rueda.

8 DEL CONCEPTO

Hasta ahora se ha presentado una serie de conceptos sobre los sistemas controlados por el mercado. La pregunta que surge es, ¿en realidad funciona de esa manera en el mundo real y, si así es, cómo? Por supuesto que funciona, y en esta sección se presentan algunos ejemplos y se muestra la relevancia de los conceptos en la rueda de la competitividad.

Esta sección está dedicada a la integración, un concepto nuevo significativo. Primero se analizará la implantación en un ambiente de producción; después se darán tres casos de implantaciones específicas de sistemas de producción integrados, de sistemas de producción por células y sistemas de manufactura flexible y manufactura integrada por computadora; se concluye la sección con la presentación de tres procesos integrados que se pueden usar en el ambiente de producción.

8.1 Panorama: sistemas de producción integrados

En la sección 5.2 se estudia la noción de integración. Una pregunta razonable en este momento sería, ¿qué es manufactura integrada? ¿Es una nueva tecnología de fabricación, una nueva tecnología de administración, un nuevo producto de computación, o una nueva forma de vida para la organización industrial? Tal vez es un poco de cada uno. La meta final de integración consiste en permitir que la empresa manufacturera sea competitiva en el mercado

Para obtener una visión más clara de la integración, se pidió prestado un ejemplo de otra área: la música. Considere el caso en el que sólo hay un músico, un solista. Al tocar, el solista sólo tiene que preocuparse por la calidad de su propia actuación. El escenario cambia cuando se tiene un trío. Ahora cada músico es un miembro de un equipo. Si uno ignora a los otros, se ob-

tiene ruido en lugar de música. La música se puede coordinar, o integrar, para que resulte más agradable (es decir, para que tenga calidad).

En el nivel de un trío, los músicos logran la integración entre ellos; esta integración se maneja **dentro** del grupo. Si tocan juntos dos grupos de músicos, entonces la preocupación se centra en la integración **entre** grupos. En una orquesta sinfónica la integración es mucho más compleja. Ahora no sólo cada grupo de instrumentos (departamentos) comienza y termina al mismo tiempo, sino que se debe dar el énfasis adecuado a cada parte de la música. El trabajo es tan complejo que se necesita un director (equivalente a un administrador) para coordinar la música. El director usa las notas de la música (algoritmo) y una batuta (herramienta de decisión) para dirigir la orquesta. ¿Cuándo es agradable la música? Cuando la integración funciona bien y cada músico está en armonía con el equipo (célula) y cada equipo está coordinado con los otros equipos (integración del sistema).

En el mundo real, igual que en el ejemplo de la música, la integración requiere distintos enfoques para los diferentes niveles de jerarquía de los grupos. En el ambiente de producción, la integración de las actividades de cierto número de máquinas (en una célula) es diferente a la integración de las actividades de toda la empresa (sistema). Se presentarán en forma breve tres aspectos de la integración de los sistemas de manufactura: el grado de integración, la esencia de la integración y la estrategia de integración, que se estudiarán en la siguiente sección.

8.2 Aspectos de los sistemas de producción integrados

8.2.1 Grado de integración

El grado de integración es la situación en la que esa integración tendrá los mayores beneficios. Los ambientes controlados por el mercado requieren que los productores tengan la **flexibilidad** para acomodar la variedad de productos demandada por el consumidor que cambia con frecuencia. La figura 2-6, una gráfica de volumen contra variedad de productos, ayuda a explicar el grado de integración.

La mejora potencial que más beneficios trae al aplicar manufactura integrada está en la zona de variedad mediana, volumen mediano, donde se requiere flexibilidad. El objetivo es lograr una producción económica de una amplia variedad de artículos, con muchos beneficios que antes se asociaban sólo con la producción en masa. Las regiones extremas se manejan mejor con otros enfoques (automatización fija para la zona de alto volumen con poca variedad y un taller intermitente para la zona de bajo volumen con alta variedad). Sin embargo, las nuevas tecnologías y técnicas administrativas [como justo a tiempo (JIT)] también han penetrado en estas áreas.

8.2.2 Esencia de la integración

A nivel del sistema, dos elementos importantes de integración son la **integración física y** la **integración de la información.**

La integración física se logra con un arreglo adecuado del equipo en la planta (distribución de planta) y del equipo de manejo de materiales que le da servicio. La novedad de la integración no está en el arreglo de la distribución/equipo de manejo de materiales sino en los conceptos de diseño, operación y control que lo gobiernan.

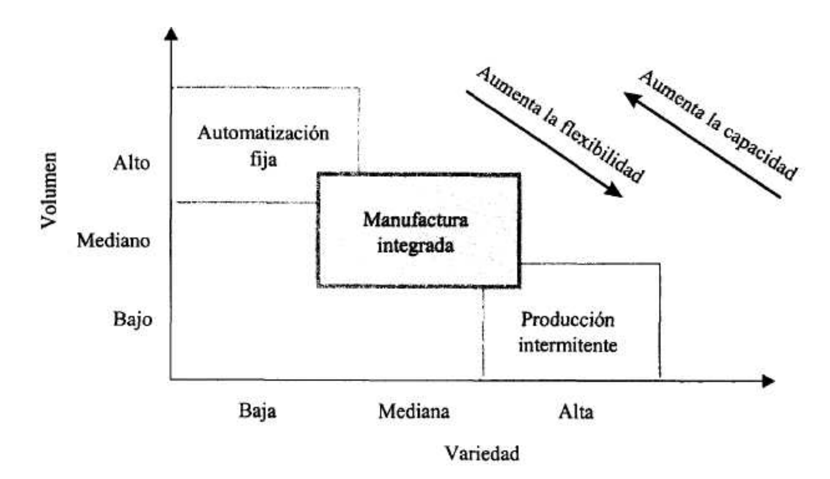


FIGURA 2-6
Una gráfica de volumen contra variedad

La integración de la información es tal vez la unidad sencilla más indicativa de los sistemas de producción integrados. Lo que realmente integra el sistema no es la cercanía o lejanía de sus unidades, sino el flujo de información entre ellas. Esto es cierto para todos los aspectos de la información: información técnica (digamos, entre el diseño de producto/proceso y el equipo de producción), información operativa (como programación de la producción o el control del flujo de materiales), y la información administrativa (para monitorear las políticas de la organización). Así, un flujo de información libre es *fundamental para el objetivo de integración.*

8.2.3 Estrategia de integración

La integración se puede examinar desde dos puntos de vista: de arriba hacia abajo o de abajo hacia arriba. En la figura 2-7 se presentan los dos enfoques. La perspectiva de arriba hacia abajo observa a la empresa como un sistema completo, es decir, analiza el sistema. La perspectiva de abajo hacia arriba ve las componentes y acciones del sistema como en síntesis.

Actualmente, existen tres enfoques principales para el diseño de sistemas de producción integrados, todos centrados en producción de volumen y variedad medianos, y son los siguientes:

Sistemas de manufactura celular (CMS) •
Sistemas de manufactura flexible (FMS)
Manufactura integrada por computadora (MIC, mejor conocida como CIM)

El CMS es un enfoque de abajo hacia arriba, CIM es de arriba hacia abajo y FMS cae en algún lugar intermedio. Estos sistemas encierran muchos de los conceptos en la rueda de la competitividad en su diseño, incluyendo calidad, tiempo, costo, flexibilidad, integración, desperdicio, jalar, etcétera. A continuación se analizan los tres sistemas.

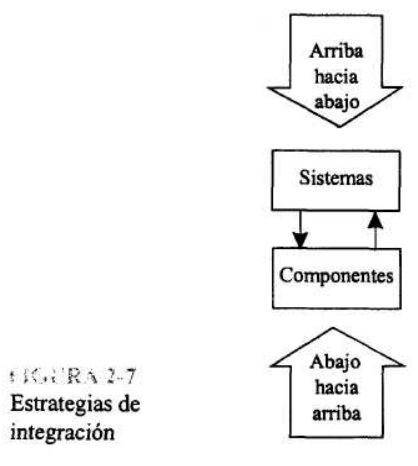


FIGURA 2-7
Estrategias de integración

8.3 Diseño de sistemas de producción integrados

8.3.1 Sistemas de manufactura celular (CMS)

En los sistemas de manufactura celular la producción está organizada alrededor de una célula de manufactura o de ensamble. ¿Qué es una célula? Existen muchas definiciones y se darán dos de ellas, una más orientada a una célula con personal y otra a una célula sin personal.

Una **célula con personal** está dedicada a la manufactura o ensamble de una familia de partes que tienen procesos similares. Los operadores de la célula son multifuncionales, es decir, pueden operar distintos tipos de máquinas. En una **célula sin personal,** el trabajador multifuncional está sustituido por un robot (u otro dispositivo mecánico) y un controlador centralizado de la célula.

La base de la manufactura celular es el proceso de agrupar las partes en familias, lo que se conoce como tecnología de grupos. La tecnología de grupos es un concepto o filosofía de manufactura donde se agrupan partes similares con el fin de aprovechar sus similitudes de diseño, proceso, programación y planeación de uso de instalaciones. Entonces, las partes similares forman una familia que posee características de diseño o manufactura análogas y el procesamiento de cada miembro de la familia es parecido. Esta agrupación hace posible el logro de las economías de escala de la producción en masa, tanto en términos de costo como de calidad. Por lo tanto, la tecnología de grupos se ha convertido en parte de los cimientos de los sistemas de producción integrados.

Una célula con personal casi siempre se distribuye en forma de U, al centro de la cual realizan las operaciones requeridas los trabajadores multifuncionales. La forma U disminuye el tiempo de caminata del operario multifuncional, contribuye a la flexibilidad de la célula que puede reforzarse reduciendo los tiempos de preparación y empleando el control de jalar (sección 5.7). En la figura 2-8 se muestra un ejemplo de una célula con personal para el ensamble de lectores de discos flexibles para computadora. (Las tarjetas *kanban* se estudiarán en el capítulo 10.) En las células con personal la integración física se logra mediante la distribución en forma de U, y la integración de información se logra con el trabajador multifuncional. El control de la producción no tiene necesariamente que ser computarizado.

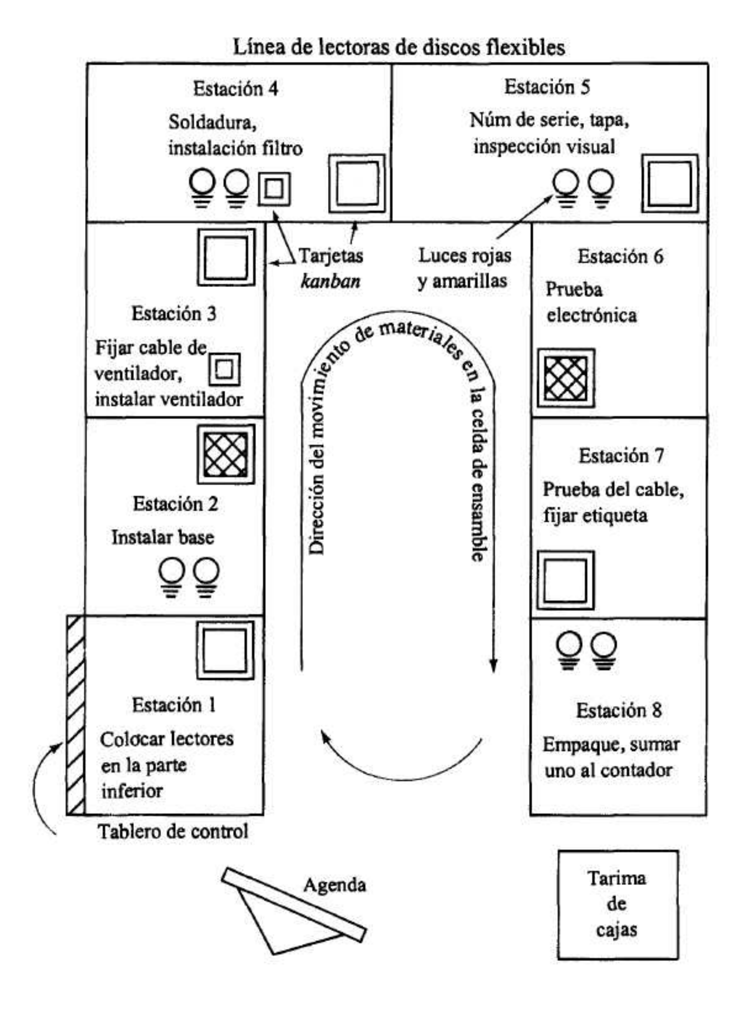


FIGURA 2-8 Célula de ensamble con personal *{Fuente:* Black, 1991) (reproducida con permiso)

En una célula sin personal la integración física de nuevo se logra a través de la distribución —ya sea en forma de U o circular—. La integración de la información se logra mediante un controlador de la célula, por lo general una computadora que maneja los controladores de las máquinas y otros equipos. Se puede cargar un plan de producción al controlador de la célula y después monitorearlo.

Un conjunto de células independientes forma un sistema de manufactura celular (CM). Sin embargo, esta integración es sólo parcial, es decir, integración dentro de las células. Si las células están ligadas por algún tipo de flujo de material, entonces se logra una integración completa. Esto se llama sistema de manufactura celular ligado (Black, 1991).

8.3.2 Sistemas de manufactura flexible (FMS)

Un sistema de manufactura flexible es otra tecnología importante para la planeación y control de la operación de la planta. Cubre también la parte media de la gráfica de variedad de produc-

to, en donde la flexibilidad es un requisito primordial. Esta característica está implícita en la siguiente definición de FMS:

> Un sistema de manufactura flexible es la integración de los procesos de manufactura o ensamble, flujo de materiales y comunicación y control por computadora. El objetivo es tener una planta que responda rápida y económicamente a los cambios en su ambiente operativo.

Los cambios comunes en el ambiente operativo se refieren a mezcla de productos, volumen de producción, descompostura de equipo, etcétera. Observe que los conceptos de la rueda de la competitividad están incluidos en la especificación de sistemas de manufactura flexible.

El sistema de manufactura flexible no existiría sin cierta madurez de las tecnologías: automatización programable, manejo de materiales automatizado, control por computadora y sistemas de comunicación. Debe hacerse notar que el FMS no está controlado por la tecnología disponible sino por la necesidad de flexibilidad creada por el ambiente controlado por el mercado.

Los procesos de maquinado, en especial en la industria de los metales, son en la actualidad las aplicaciones más importantes de los sistemas de manufactura flexible. Sin embargo, están surgiendo en muchas aplicaciones diferentes, en especial en las operaciones de ensamble (por ejemplo, en el ensamble electrónico). Estos sistemas en ocasiones reciben el nombre de sistemas de ensamble flexible (SEF). La figura 2-9 es un FMS representativo del trabajo con metales. Las tres componentes principales son el equipo de producción (1, 2 y 7 en la figura), el equipo de manejo de materiales (3) y la red de comunicaciones y control computarizado (12).

Es posible que la **red de comunicaciones y control computarizado** sean los aspectos más importantes y complejos de cualquier sistema con un alto grado de integración, incluyendo un SMF. Más aún, es el elemento clave al implantar la planeación y control de la producción integrados en un sistema de manufactura flexible, puesto que una de las funciones principales de un sistema de control por computadora es el control de la planta, junto con los aspectos de control de la producción y la programación. De esta manera, el software de control de un sistema de manufactura flexible debe incluir algún algoritmo para la planeación y control de la producción integrados.

El flujo de información es un elemento importante en la operación de un FMS. El éxito de este tipo de sistemas por lo general depende de la recolección y la reacción en tiempo real a los datos en forma oportuna. Con base en estos datos, los sistemas de control deben ajustarse cuando los eventos no ocurren conforme a lo planeado.

8.3.3 Manufactura integrada por computadora (CIM)

La manufactura integrada por computadora es un tercer enfoque a la producción de volumen medio y variedad media. La manufactura integrada por computadora tiene un alcance más amplio que los sistemas de manufactura celular o flexible. No sólo está basado en computadora, sino que incluye un alto grado de integración entre todas las partes del sistema de producción. Todas las funciones de producción están ligadas a una gran base de datos en computadora, y se proporciona acceso a estos datos a los distintos departamentos (usuarios) en la organización. En teoría, los materiales entran por un lado de la planta y por el otro salen los productos terminados con sólo oprimir un botón. En la realidad, el logro de este objetivo ha sido extremadamente raro.

Entonces, ¿qué es CIM? No existe una definición estándar. Algunos ven a la manufactura integrada por computadora como una tecnología, pero otros piensan que es una filosofía de ad-

1 Cuatro centros de maquinado Milacron T30 CNC

2 Cuatro estaciones de intercambio de herramientas una por máquina, para reparto en cadena de almacenamiento vía carrito controlado por computadora.

3 Tres carritos controlados por computadora, con trayectoria guiada por cable.

4 Estación de mantenimiento de carritos

5 Estación de lavado de partes, manejo automático

6 Cambiador automático (10 tarimas) para cola en la línea

7 Un módulo de inspección: máquina de medición coordinada tipo horizontal

8 Tres estaciones de cadenas de reparto de herramientas

9 Carga/descarga de la cadena de reparto de herramientas

10 Cuatro estaciones de carga/descarga de partes

11 Estación de construcción de tarimas/di

12 Centro de control, cuarto de computad (elevado)

13 Sistema centralizado de chips/enfriam recolección/recuperación

Estación de giro para carrito (hast vuelta sobre su eje)

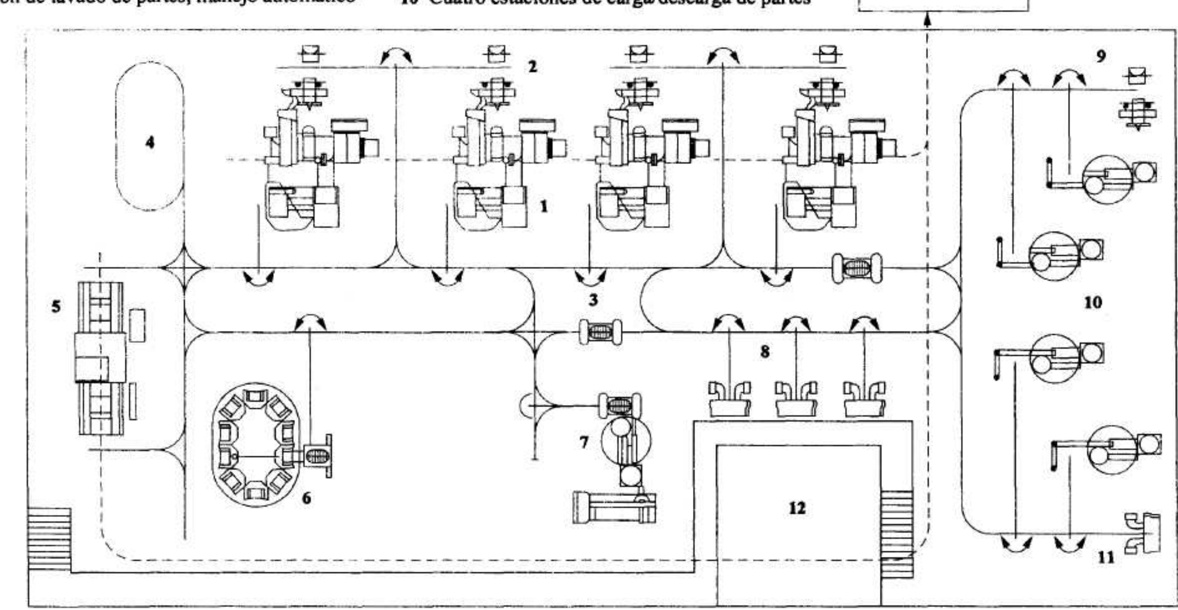


FIGURA 2-9
SMF en Millcron (Fuente: Miller y Walker, 1990) (reimpreso con permiso de Fairmont Press, Inc.)

ministración. En la opinión de los autores, ambas son correctas; vemos CIM como una filosofía de administración que tiene la tecnología requerida para implantarla. Se propone la siguiente definición:

> La manufactura integrada por computadora es una filosofía de administración que usa computadoras, comunicación y tecnología de la información para coordinar las funciones de negocios con desarrollo del producto, diseño y manufactura. El objetivo es obtener una mejor posición de competitividad mediante el logro de un alto nivel de calidad, entrega a tiempo y costo bajo.

Debe quedar claro con esta definición que los elementos primordiales en la manufactura integrada por computadora son la información y la tecnología de la información. Se desea llevar la noción de CIM un paso adelante: es una meta estratégica que una empresa lucha por lograr a través del tiempo. Esta definición es consistente con la rueda de la competitividad y los objetivos de los sistemas de producción que se presentaron.

Puede haber cierta confusión entre los sistemas de manufactura flexible y la manufactura integrada por computadora. Algo que los distingue es que los FMS manejan en esencia la planta, es decir, la integración local, mientras que CIM va más allá de la planta hacia la integración global. Analizando este argumento, los sistemas de manufactura flexible representan más un enfoque desde abajo hacia la automatización, mientras que CIM trabaja de arriba hacia abajo. Dicho de otra manera, los FMS crean islas de automatización en la planta, mientras que CIM crea puentes entre las islas para integrarlas. A la larga estos dos enfoques tenderán a unirse. Los sistemas de manufactura flexible se convertirán en sólo otro aspecto de un sistema de manufactura integrado por computadora. Sin embargo, pasará algún tiempo antes de que esto ocurra a gran escala. Para llegar ahí, el diseño de sistemas debe ser una parte de la estrategia de automatización a largo plazo.

8.3.4 Beneficios de los sistemas de producción integrados

Aunque se logran de distintas maneras, los tres tipos de sistemas de producción integrados tienen ciertos beneficios comunes que corresponden a los elementos de la rueda de la competitividad: calidad, tiempo, costo, integración, flexibilidad y desperdicio. Se da una lista de estos beneficios en la tabla 2-1.

Numerosas aplicaciones demuestran los beneficios de los sistemas de producción integrados. Por ejemplo, en una planta de John Deere que produce cilindros hidráulicos, el cambio a manufactura celular produjo los siguientes resultados (Martin, 1984):

TABLA 2-1
Beneficios de los sistemas de producción

Tiempo de entrega más corto Recepción de mercancía confiable
Flexibilidad en la programación de la producción
Inventario en proceso reducido
Tiempo de preparación menor
Menores requerimientos de espacio en la planta
Mejor calidad
Calidad consistente
Control administrativo mejorado

Los números de partes se redujeron de 405 a 75
El inventario se redujo de 21 días a 10 días El
tiempo de preparación se acortó un 75%
- El tiempo de entrega disminuyó en un 42%
- El desperdicio se redujo 80%

De los tres enfoques de sistemas de producción integrada, la manufactura celular es el que más se usa. La razón es que integra el proceso de manufactura sin necesidad de una inversión de capital importante.

Existen algunos procesos de integración que complementan y perfeccionan la implantación de los sistemas de producción integrados. Se estudiarán algunos de ellos en la siguiente sección.

8.4 Procesos de integración

La integración es un elemento clave de los sistemas de producción controlados por el mercado. Los beneficios completos de estos sistemas no se obtendrán a menos que se lleven a cabo ciertos procesos de integración. Algunos de éstos se relacionan con el diseño del producto y del sistema, pero otros se refieren a la operación del sistema. Se presenta un panorama general de los tres procesos: trabajo en equipo, administración total de la calidad (TQM) e ingeniería concurrente. Primero se analizará el trabajo en equipo que es parte del papel del empleado en la rueda de la competitividad.

8.4.1 Trabajo en equipo

Las máquinas no manejan una organización, lo hace la gente. Las personas constituyen el recurso más importante de una empresa y marcan la diferencia en el análisis final. Es lógico que el elemento humano sea la base de muchos procesos de integración.

Cuando se habló del diseño de los sistemas de producción integrados, se hizo notar la necesidad de dos aspectos de integración: el físico y el de información. La misma filosofía se aplica, en cierto sentido, a la participación de la gente en el proceso de integración, que se logra construyendo equipos multifuncionales para lograr un objetivo específico. Las reuniones del equipo proporcionan la integración física. La integración de la información es el resultado de que cada miembro comparta sus conocimientos sobre las diferentes disciplinas con el resto del equipo.

Un resultado del trabajo en equipo es la eliminación de barreras funcionales dentro de la organización, esas "paredes" entre departamentos que impiden la integración. Más aún, al participar personas de distintas disciplinas, los resultados serán más aceptables para todos. Además, se pone a trabajar un amplio acervo de inteligencias, que puede generar una amplia gama de buenas ideas.

El trabajo en equipo en sí no es una idea nueva. La novedad estriba en que se ha convertido en un enfoque de toda la empresa y en parte del proceso administrativo dirigido al logro de la integración. El trabajo en equipo es la base de dos procesos primordiales de integración: la ingeniería concurrente y la administración de la calidad total, que se estudiarán en las siguientes secciones.

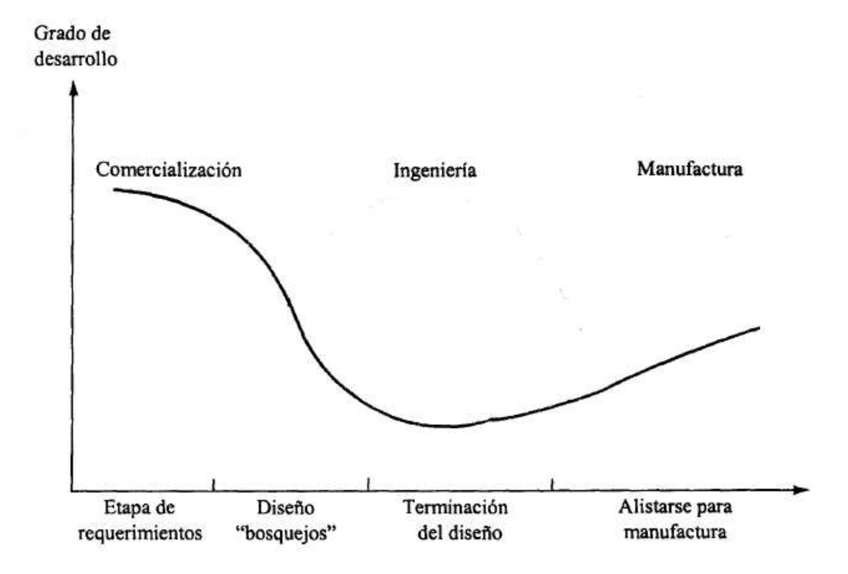


FIGURA 2-10 Participación del equipo por funciones *(Fuente:* Blackbum, 1991) (reimpreso con permiso de Irwin Professional Publishing)

8.4.2 Ingeniería concurrente

La ingeniería concurrente, también conocida como ingeniería simultánea, ingeniería sustentable o ingeniería del ciclo de vida, se describe mejor mediante la siguiente definición:

> La ingeniería concurrente es un enfoque sistemático para el desarrollo concurrente e integrado de los productos y sus procesos, incluyendo la manufactura y el soporte. Este enfoque intenta que el desarrollo, desde el principio, considere todos los elementos del ciclo de vida del producto, desde su concepción hasta que es desechado, incluyendo calidad, costo, programación y requerimientos del usuario. (Institute for Defense Analysis, 1988.)

La ingeniería concurrente sustituye al procedimiento secuencial del diseño del producto y del proceso con uno paralelo; los diseños de producto y proceso se consideran juntos, con una visión más amplia que elimina la barrera funcional entre el diseño del producto y la manufactura del mismo.

El proceso de la ingeniería concurrente se implanta usando el enfoque de trabajo en equipo; se forman equipos interdisciplinarios que incluyen representantes de diseño y producción, mercadotecnia, calidad y algunas veces finanzas. Cada equipo es responsable de un producto o familia de productos. Su misión es acortar el tiempo desde el concepto del producto hasta la comercialización, que a menudo se llama tiempo para comercializar. Al hacerlo, se logra un diseño de producto con bajos costos de fabricación y alta calidad.

La ingeniería concurrente organiza el trabajo del equipo. Estructura el flujo de discusiones y conclusiones de manera que las personas que más adelante en el proceso toman las decisiones estén involucradas en las decisiones tomadas antes. El nivel de participación de los miembros del equipo durante la ingeniería concurrente es un proceso dinámico, como se muestra esquemáticamente en la figura 2-10. Al inicio, mercadotecnia tiene la mayor participación. Después, cuando se definen los requerimientos, la mayor contribución viene de los diseñadores de pro-

ducto, seguido por el diseñador del proceso. El hecho importante es que el proceso está integrado; cada función participa en todas las etapas.

8.4.3 Administración de la calidad total (TQM)

La administración de la calidad total es un buen ejemplo para demostrar la evolución de los procesos en los sistemas controlados por el mercado. Algunas personas piensan que TQM es un enfoque distinto a la calidad y otros la ven sólo como otra palabra de moda. Entonces, ¿qué es en realidad? ¿Y qué importancia tiene en el contexto de la producción integrada? Estos y otros aspectos se analizarán en esta sección.

Existen varias definiciones distintas de TQM. Se eligió definirla como sigue:

> TQM es una cultura enfocada a la calidad para toda la organización. Es un esfuerzo para lograr la excelencia en todas la actividades. Involucra a todos los miembros de la organización en todos los niveles de operación.

La calidad total es un filosofía de administración más que otra tecnología de calidad. Su origen se atribuye a la industria japonesa y emigró a Occidente hace más de una década. Irónicamente, en Japón la TQM surgió a principios de los años 50 a partir de la filosofía de la calidad del Dr. W. Edward Deming, un famoso experto estadounidense sobre calidad.

En Occidente, un proceso evolutivo condujo a la TQM, cuyas tres etapas principales son el control estadístico de la calidad, el control de calidad total y la administración de la calidad total.

El control estadístico de la calidad consiste en el uso de métodos estadísticos para controlar la calidad. Se originó en Estados Unidos a mediados de la década de 1930, con el trabajo de Shewhart. Estos métodos se ampliaron con el tiempo y todavía son parte importante de cualquier programa de calidad. Una técnica importante en este contexto es el control estadístico del proceso (CEP), una herramienta estadística usada para controlar la variabilidad del proceso con el fin de lograr un producto de alta calidad. Las computadoras personales reforzaron el uso del control estadístico de procesos en la planta. Su concepto organizacional es que la calidad del producto es responsabilidad de la función de control de calidad. Esta filosofía es característica de la era de los sistemas controlados por la producción.

El control de calidad total amplía los aspectos organizacionales del control estadístico de calidad, pero no cambia las herramientas básicas. La filosofía del control de calidad total reconoce que la calidad del producto no es sólo responsabilidad de la función de control de calidad. Todas las partes de la organización, como manufactura, ingeniería y comercialización, deben compartir esta responsabilidad; este proceso es un ejemplo de integración organizacional. En retrospectiva, este concepto fue parte de la transición de los sistemas controlados por la producción a los controlados por el mercado.

La administración de la calidad total se puede ver como el arranque hacia el control total de la calidad. Es una filosofía de administración con un conjunto de herramientas de apoyo y es un producto de los sistemas controlados por el mercado. La administración de la calidad total amplía el alcance de la calidad y el grado de participación. La calidad ya no se refiere sólo a la calidad del producto; es la calidad de todas las actividades en la organización, que incluyen investigación y desarrollo, finanzas, mantenimiento, contabilidad y ventas. Más aún, la calidad es responsabilidad de cada miembro de la organización, desde el presidente hasta los empleados de tiempo parcial.

SECCIÓN 8 EJERCICIOS

2.25. ¿Cuáles son los diferentes aspectos de la integración?

2.26. Se piensa que la producción integrada es más adecuada para ambientes de producción de variedad y volumen medios. ¿Por qué?

2.27. ¿Cuáles son los diferentes enfoques para la producción integrada?

2.28. ¿Cuáles son las metas de integración?

2.29. Defina cinco medidas de desempeño que se espera mejorar como resultado de la integración.

2.30. Consulte los beneficios de los sistemas de producción integrados de la tabla 2-1. Estos aspectos, ¿son interdependientes o están interrelacionados? Dé unos cuantos ejemplos de cómo la mejora de un aspecto puede llevar a la mejora de otro.

2.31. ¿Cuáles son los beneficios de las células de manufactura o ensamble en "forma de U"? ¿Cuál es su relación con la integración?

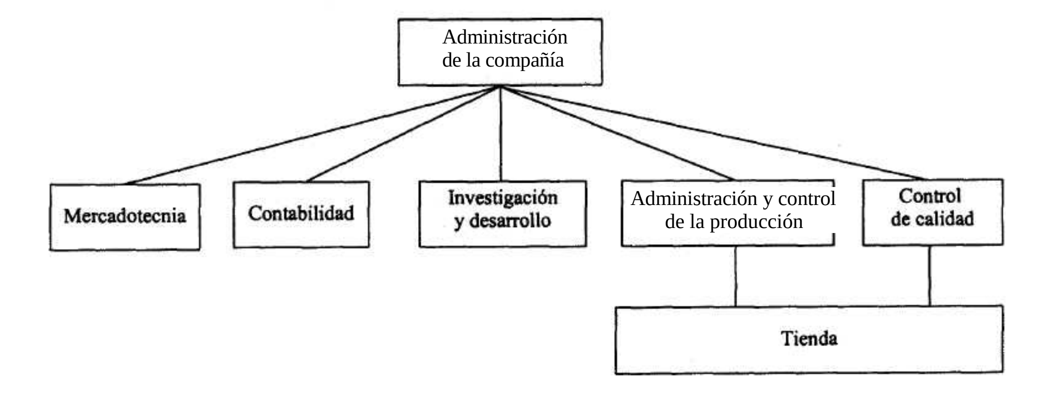
2.32. Explique cómo se puede implantar la integración física y de información en los siguientes casos:

a) Sistemas de manufactura celular
b) Sistemas de manufactura flexible

2.33. ¿Cuáles son las implicaciones de la integración parcial —por ejemplo, al implantar sólo la inte gración física o la integración de información—?

2.34. Teddy Bear Inc. es un fabricante de juguetes cuyas principales materias primas son plástico y fi bras. Los productos terminados se venden a través de distribuidores a las tiendas y los consumido res. La jerarquía y estructura de la compañía se ilustran en la figura siguiente. El departamento de mercadotecnia es responsable de los canales de distribución, el manejo de órdenes y los pronósti cos de demanda. El departamento de contabilidad maneja los asuntos financieros. El departamen to de investigación y desarrollo diseña nuevos productos, mejora los existentes y planea los procesos. El departamento de administración y control de la producción programa los lotes para la fabricación y recibe retroalimentación de la planta. El departamento de control de calidad realiza la inspección en línea.

a) Para cada departamento del diagrama, defina al menos cinco tareas que normalmente desem peñen.
b) Para cada tarea, defina al menos dos elementos de información esenciales para completarla. Por ejemplo, administración y control de la producción proporciona lotes a producción y nece sita acceso a los datos de demanda y a los planes de Producción.
c) Intente localizar los elementos de información compartidos por más de un departamento. ¿De qué manera se relacionan con la integración de la información?



d) ¿Cuáles son las implicaciones de manejar varios departamentos sin una base de datos central de información compartida? *é)* ¿Qué tipo de infraestructura se necesita para implantar la integración de la información en esta compañía?

9 MANUFACTURA DE CLASE MUNDIAL (MCM)

La definición de **clase mundial** se ha discutido mucho al igual que el camino para lograrla; el término se ha hecho popular en la literatura, debido principalmente al libro de Schoenberger, *World Class Manufacturing* (1986). Antes se usaba un término común, **manufactura de excelencia.** En ambos casos la meta es lograr la capacidad de una fabricación superior. No existe un estándar en la definición de clase mundial. Sin embargo, este término representa la influencia de una nueva dinámica de mercado, el mercado global, y capta el aliento y la esencia de cambios fundamentales que tienen lugar en las empresas industriales exitosas. Algunas definiciones que aparecen en la literatura incluyen sólo filosofías, pero otras contienen filosofías y los medios para lograrlas. Se presentan cuatro definiciones publicadas y después se propone una propia.

Hayes *et al.* (1988) define la manufactura de clase mundial como sigue:

Convertirse en el mejor competidor; ser mejor que casi cualquiera de las otras compañías en el sector al menos en un aspecto de la manufactura. Ser más rentable que los competidores. Contratar y retener a las mejores personas.

- Desarrollar personal de ingeniería con los mejores conocimientos.
- Poder responder con rapidez y decisión a las condiciones cambiantes del mercado.
- Adoptar un enfoque de ingeniería para el producto y el proceso que maximice el desempeño de ambos.
- Mejorar continuamente.

Huge y Anderson (1988) describen una nueva filosofía de manufactura de excelencia que está basada en los dos principios fundamentales de la mejora continua y la eliminación del desperdicio.

Schoenberger (1986) identifica el momento de cambio a la manufactura de clase mundial como 1980, año en que las compañías estadounidenses comenzaron a rediseñar sus aparatos de fabricación. Como la meta más importante, sugiere "mejora continua y rápida" en calidad, costo, tiempo de entrega y servicio al cliente.

El National Center for Manufacturing Services (NCMS) Report (1988) presenta ocho áreas de principios de operación que giran alrededor tanto del cliente como de la calidad.

Enfoque administrativo
- Estrategia de manufactura
- Calidad y cliente

Capacidad de manufactura
- Medidas de desempeño

Organización
- Recursos humanos
- Tecnología

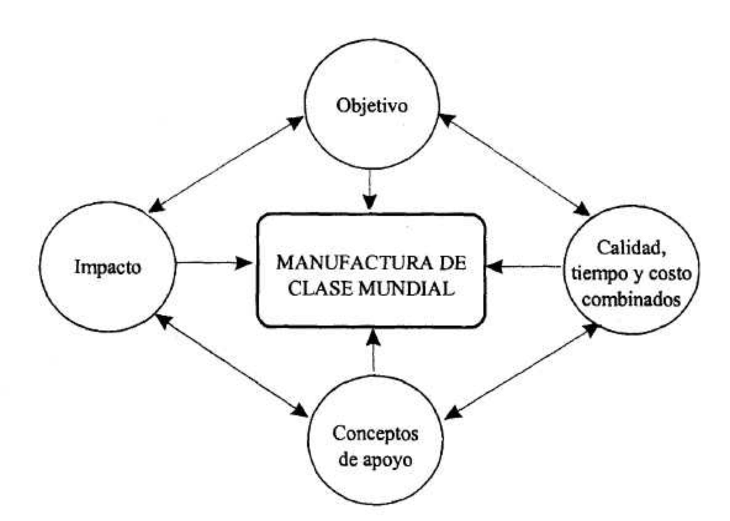


FIGURA 2-11
Manufactura de clase mundial

Esas áreas se desglosan en principios adicionales. La premisa de la NCMS es que estos principios, ejecutados en concierto, aumentarán la competitividad de cualquier fabricante hasta el desempeño de clase mundial.

Es obvio que estas definiciones no se contradicen sino que se complementan. Cada una hace hincapié en aspectos diferentes y proporciona una mezcla de conceptos, principios y herramientas.

Nuestra definición de manufactura de clase mundial está basada en el objetivo de los sistemas de producción definido en este capítulo. *Una organización de manufactura de clase mundial es aquella que se suscribe al objetivo de aumentar continuamente la satisfacción del cliente; adopta las metas de operación —calidad, tiempo y costo combinados—; hace suyos los conceptos de apoyo, y se compromete al impacto en la organización del proceso de cambio.* Esta definición se representa esquemáticamente en la figura 2-11.

Existen dos tendencias en la literatura: una asegura que para tener éxito tienen que adoptarse los conceptos de apoyo, pero la otra selecciona uno o dos "campeones". Creemos que ambos enfoques están equivocados. Los mercados son diferentes; las organizaciones y culturas son distintas, de manera que no existe una manera única de ganar la batalla. Situaciones difeentes, aun dentro de la misma organización, pueden requerir una **mezcla** distinta de estos conceptos y las herramientas relacionadas. El **arte de administrar** para crear la mezcla adecuada llevará a los mejores resultados. Como dice Macbeth (1989) (usado con permiso de Springer Verlag New York, Inc.),

> Una de las características de los negocios occidentales es que resulta demasiado fácil que nos convenzan de los méritos de una "solución" particular y como resultado, suponemos que no queda nada más por hacer. De esta manera las empresas se mueven de una "panacea" a otra cuando el último "gurú" declara cuál debe ser el "sabor del mes".

Debe establecerse con toda claridad que no existe un enfoque de "todos o uno". Una mezcla adecuada de estas filosofías, conceptos y herramientas queda determinada por cada situación particular.

Recientemente, han surgido dos filosofías administrativas sobre la manufactura de clase mundial: la producción ligera y la manufactura ágil. Se estudiarán enseguida.

9.1 Producción ligera

La **producción ligera** es un término inventado por el grupo de investigación del MIT (Womack *et al*, 1990). Durante cinco años de estudio sobre el futuro de la producción automotriz examinaron 90 plantas en 19 países. Su estudio promueve la eliminación del inventario y otras formas de desperdicio, mayor flexibilidad en la programación de la producción, tiempos de entrega más cortos y niveles avanzados de calidad en el producto y en el servicio al cliente. La producción ligera combina las ventajas de la producción en masa y la artesanal sin la rigidez de la primera o los altos costos de la última. Una componente esencial de la producción ligera es el uso de equipos interdisciplinarios en todos los niveles de la organización.

Es claro que la producción ligera emplea muchos de los conceptos y procesos que se describieron. Se reconoce ampliamente que Japón estaba mucho más adelante que el resto del mundo en su implantación, que comenzó en los 50 en la Toyota. La industria occidental no se puso al corriente hasta la década de los 80.

Se decidió usar el término debido a que usa menos de todo, comparado con la producción en masa —menos recursos humanos en la fábrica, menos espacio para la manufactura y menos tiempo de ingeniería para desarrollar el producto—.

La producción ligera difiere de la producción en masa de varias maneras, pero la mayor diferencia está en los objetivos finales. Por implicación, la producción en masa establece una meta límite, la de suficientemente bueno. En el sentido operativo, existe un número aceptable de defectos, un nivel aceptable de inventario y una variedad baja de productos aceptable. El razonamiento era que hacerlo mejor costaba más y hacerlo mejor no se requería en la era controlada por la producción.

La producción ligera pone la mira en el desempeño, definiendo una trayectoria hacia la perfección: cero defectos, costos menores, mayor flexibilidad y más variedad de productos. Así, la producción ligera es un resultado de los sistemas controlados por el mercado.

9.2 Manufactura ágil

El concepto de **manufactura ágil** comenzó en un informe titulado "Estrategia empresarial de la manufactura del siglo xxi" (Goldman *et al*, 1991). Este estudio, hecho por el Iacocca Institute en Lehigh University, incluyó más de 150 ejecutivos industriales. El informe describe la posible evolución de la competitividad industrial en los siguientes 15 años. Se formó una organización llamada Agüe Manufacturing Enterprise Forum (AMEF) para continuar este trabajo. El esfuerzo del Iaccoca Institute se inspiró, hasta cierto punto, en el estudio japonés Manufacturing 21, que describe los escenarios para la competitividad japonesa en el siglo xxi.

El mayor impulso de la manufactura ágil es una visión de empresa (Sheridan, 1993), que específicamente incluye lo siguiente:

Mayor diversificación de productos, fabricación por pedido pero a un costo unitario relativamente bajo

- Introducción rápida de productos nuevos o modificados, en algunos casos a través de la formación rápida de una sociedad estratégica temporal para aprovechar oportunidades de nichos de mercado breves, lo que se llama empresa u organización virtual Productos que se pueden actualizar, diseñados para desensamblarlos, reciclarlos y recon-figurarlos

Relación interactiva con el cliente
Reconfiguración dinámica de procesos de producción con el fin de dar lugar a pequeños cambios en el diseño del producto hasta nuevas líneas de producto
Compromiso con productos y operaciones benignos con el medio ambiente

Al examinar estas especificaciones, se ve que la manufactura ágil usa muchos de los conceptos de la rueda de la competitividad.

En la planta, la reconfiguración es el aspecto principal para la agilidad. Se trata de la habilidad para reunir con rapidez los recursos necesarios para cumplir con entregas específicas, digamos una fecha de entrega para un pedido grande. Todavía más, la reconfiguración se debe llevar a cabo a un costo razonable.

El concepto de manufactura ágil todavía es algo amorfo, y algunos de los sistemas de apoyo tienen que desarrollarse. Sin embargo, este enfoque parece ser el mejor para crear una visión de las empresas manufactureras en el próximo siglo.

9.3 Ligera contra ágil

A primera vista, la manufactura ágil puede parecer otra manera de describir la producción ligera. Existen similitudes, pero también diferencias.

La diferencia más importante es que la manufactura ágil toma el punto de vista de la empresa, mientras que la mayor preocupación de la producción ligera es la planta. Lo que es más, algunos ven a la producción ligera como una mejora a los métodos de producción en masa. La agilidad implica romper con el modelo de producción en masa para fabricar una mayor variedad de productos.

Pensamos que las diferencias sutiles entre la producción en masa y la manufactura ágil no son tan importantes. Lo que en realidad cuenta es que ambas están basadas en conceptos similares (aquellos descritos en la rueda de la competitividad). Más aún, se ve cada una como un paso más en la trayectoria para desarrollar nuevas teorías de producción.

SECCIÓN 9 EJERCICIOS

2.35. ¿Cuál es el denominador común de las distintas definiciones de manufactura de clase mundial?
2.36. ¿Qué conceptos de la rueda de la competitividad son parte de la producción ligera?
2.37. Identifique tres elementos importantes de la manufactura ágil. Explique su selección.

10 RESUMEN

La competitividad en Estados Unidos declinó a mediados de los 60. Desde entonces, Japón ha captado muchos mercados en ese y otros países porque podían hacer productos mejor, más rápido y a menor costo. Llevó tiempo darse cuenta de que se requieren distintos enfoques para enfrentar el nuevo ambiente industrial. En la búsqueda de nuevos enfoques se analizó la producción en Japón y Estados Unidos.

El éxito japonés, en un principio, fue una sorpresa para las compañías estadounidenses. Esta sorpresa se convirtió enseguida en admiración y después en la concientización de que era necesario volver a tener ventaja competitiva. Algunas compañías estadounidenses intentaron

imitar a Japón mientras que otras desarrollaron nuevos enfoques. Por prueba y error, surgieron los mejores conceptos de los sistemas de producción de ambos países: algunos clásicos, algunos japoneses y otros americanos nuevos.

Si se observa el estado de las teorías administrativas actuales, se concluye que las teorías clásicas no cubren todos los aspectos del nuevo ambiente. Estos conceptos se integran en la "rueda de la competitividad". Creemos que los conceptos en esta rueda son algunos de los requeridos para regresar a Estados Unidos a su posición de líder.

La rueda de la competitividad contiene cuatro círculos concéntricos que representan diferentes aspectos de la nueva teoría de administración de la producción. Estos círculos son centro, entrega, apoyo e impacto. El centro de la rueda es el cliente. El círculo de entrega muestra lo que hay que proporcionar al cliente: calidad, tiempo y costo. El círculo de apoyo muestra 11 conceptos necesarios para apoyar lo que entrega el sistema de producción. El círculo de impacto habla de un cambio en la cultura organizacional.

El capítulo incluye un estudio detallado de cada círculo. Se definen satisfacción del cliente, tiempo, costo y calidad. Se analizan los conceptos de integración, flexibilidad, sencillez, jalar, desperdicio, mejora y otros. El impacto sobre la cultura organizacional se refleja en la transición de una cultura de eficiencia a una de efectividad. Se lleva varios años lograr esta transición; no existe un camino rápido.

En nuestra definición, el objetivo de un sistema de producción es hacer la contribución máxima para la constantemente creciente satisfacción del cliente, de donde resultan las metas operativas de calidad, tiempo y costo.

Para ilustrar mejor los conceptos, se profundizó sobre la integración, mostrando la manera en que genera un nuevo ambiente de manufactura: los sistemas de producción integrados. Se estudiaron tres tipos comunes de implantación de la producción integrada: sistemas celulares, flexibles e integrados por computadora. Al estudiarlos se hizo notar, para cada tipo de sistema, el uso de los conceptos presentados en la rueda de la competitividad. Se profundizó en tres procesos que refuerzan la integración: trabajo en equipo, administración de la calidad total e ingeniería concurrente.

A continuación se analizó el concepto de manufactura de clase mundial y dimos nuestra definición. Se hizo hincapié en la necesidad de evaluar cada situación de manera independiente; ninguno de estos conceptos resuelve todos los problemas. Sin embargo, una mezcla adecuada de ellos y el sentido común proporcionarán un buen punto de partida.

Por último, se estudió la producción ligera y la manufactura ágil. Estas dos filosofías incipientes surgieron de la manufactura de clase mundial y es muy probable que influyan en la dirección que tomen la producción en el siglo XXI.

11 REFERENCIAS

Black, J. T., *The Design ofa Factory with a Future,* McGraw-Hill Publishing Company, Nueva York, 1991.

Blackburn, J. D., *Time Based Competition,* Business One, Irwin, Homewood, IL, 1991. Deming, W., *Out ofthe Crisis,* MIT Press, Cambridge, MA, 1986. Hayes, R. H., Wheelwright, S. C. y Clark, K. B., *Dynamic Manufacturing, Creating the Learning Or-*
ganization, Free Press, Nueva York, 1988. Huge, E. L. y Anderson, A. D., *The Spirit of ManufacturingExcellence: An Executive Guide to the New*
MindSet, Dow Jones-Irwin, Homewood, IL, 1988.

Goldman, S. L. y Preis, K., *21 sí Century Manufacturing Enterprise Sírategy,* Informe del Iacocca Institute, Lehigh University, 1991.
Institute for Defense Analysis, Report R-338, diciembre, 1988. Macbeth, D. K., *Advanced Manufacturing Strategy and Management,* IFS Publications, Springer-Verlag,
Berlín, 1989. Martin, J. M., "Cells Drive Manufacturing Strategy", *Manufacturing Engineering,* 102, 49-54, enero,
1989. Miller, R. K. y Walker, T. C, *FMS/CIM Syslems Integration Handbook,* The Fairman Press, Liburn, GA,
1990. National Center of Manufacturing Sciences, *World Class Manufacturing: Operating Principies for the*
1990 's and Beyond, NCMS, Washington, DC, 1988. Schoenberger, R., *Buildinga Chain ofCustomers: Linking Business Functions to Créate the World Class*
Company, Free Press, Nueva York, 1990. Schoenberger, R., *World Class Manufacturing: The Lessons of Simplicity Applied,* Free Press, Nueva
York, 1986.
Sheridan, J. H., "Agüe Manufacturing", *Industry Week,* abril 19,1993. Womack, J. P., Jones, D. T. y Roos, D., *The Machine That Changed the World: The Story ofLean Production,* Rawson Associates, Nueva York, 1990.

CAPÍTULO

3 *Solución de problemas*

1 INTRODUCCIÓN

Blake planeó una carrera en investigación de operaciones, pero cambió su manera de pensar después de una práctica de trabajo de verano en el Banco Mundial. Cuando le preguntaron por qué, contestó, "no vi una sola aplicación de 10 en el Banco Mundial". El siguiente verano, Tania trabajó en el Banco Mundial y desarrolló un modelo de programación lineal para asignar recursos en el sector agrícola de Egipto. La contrataron otro año para continuar su trabajo en el modelo. ¿Por qué fue distinta la experiencia de los dos estudiantes?

Blake esperaba que alguien le proporcionara un problema bien definido con el que pudiera alimentar datos a la computadora y resolverlo. Esto casi nunca ocurre. Tania examinó los aspectos que eran importantes para el Banco Mundial y modeló un problema que podía resolverse por programación lineal. Tania soluciona problemas; Blake no.

Es difícil enseñar a resolver problemas; se trata más de un arte que de una ciencia. Para aprender a resolver problemas, hay que hacerlo. Igual que andar en bicicleta, las explicaciones ayudan, pero eventualmente debe hacerse. Se puede caer, pero eso casi siempre es necesario para andar en bicicleta. El fracaso también es una parte frecuente al aprender a resolver problemas. No existe una fórmula mágica para la solución de problemas.

Debido a la dificultad para enseñar a resolver problemas, la mayoría de los libros se centran en las técnicas para resolver modelos. Debe entenderse cómo usar esas técnicas, pero no es suficiente saber cómo alimentarlos y arrancarlos. También debe ponerse atención al proceso de solución de problemas.

Este capítulo contiene sugerencias sobre el arte de la solución de problemas. En la sección 2 se da un visión general del enfoque de solución de problemas. Cada una de las siguientes seis secciones cubre un paso de este proceso. Se presenta cómo identificar un problema en la sección 3, la comprensión del problema en la sección 4 y el desarrollo del modelo en la 5. La solución de modelos, la interpretación de la solución y la implantación se cubren en las secciones 6, 7 y 8. Se, hace un comentario breve sobre el uso de las computadoras en la solución de problemas (sección 9) y en la sección 10 se ve la evolución de los enfoques de la solución formal de problemas. En la sección 11 se resume el capítulo y la sección 12 contiene las referencias.

1.1 Problemas

¿Qué es un problema? Cada día nos enfrentamos a problemas, pero no es sencillo definirlos. Un **problema** existe cuando lo que ocurre difiere de lo que debería ocurrir. Lo que está sucediendo es el estado actual y lo que debería suceder es el estado meta.

Se conocen el estado actual y el estado meta en los problemas bien estructurados. Un ejemplo es encontrar el mínimo de una función cuadrática. El estado actual es la función, y el estado meta es su mínimo. Otros problemas tienen una estructura pobre. Éstos pueden no tener un estado meta claro, ni siquiera un estado actual bien definido. Mejorar la calidad de vida es un problema con estructura pobre.

Los problemas pueden ser de una sola vez o recurrentes. Decidir cuántas pijas producir cada mes es un problema recurrente, pero determinar la causa de la descompostura de una máquina es un problema de una vez. Muchos conceptos para la solución de problemas se aplican a ambos tipos de problemas, pero cada problema tiene una situación distinta. Los problemas recurrentes requieren la recolección continua de datos, informes y otros elementos de infraestructura.

Cada problema tiene una vida diferente. Para algunos problemas debe obtenerse una solución rápida, y otros no son tan urgentes. No se puede llevar mucho tiempo desarrollar un programa para las corridas de programas en una computadora, ya que el tiempo para correrlos generalmente es corto. Por otro lado, se dispone de más tiempo para determinar la localización de los departamentos en una planta que se va a construir el año próximo.

Los problemas también tienen diferente impacto. Los problemas que se resuelven deben merecer los recursos que se usaron para resolverlos. Citando a Gene Woolsey (Woolsey y Swanson, 1975), si cuesta más realizar el estudio que los ahorros que se obtendrán, *no debe hacerse*. El impacto del problema debe determinar el esfuerzo dedicado para resolverlo.

Los estudios económicos pueden justificar la solución de algunos problemas. Para otros, la justificación basada sólo en costos o ganancias es difícil; la reducción de tiempos de entrega es un ejemplo. Si los tiempos de entrega no se reducen, los clientes pueden comprar a un competidor que pueda entregarles más rápido. La estimación del costo de la pérdida potencial de clientes es complicada. La identificación de todo el impacto incluye conceptos difíciles de cuantificar y es crítica para conocer qué problemas merecen el esfuerzo.

Los problemas comunes no desaparecen a menos que se haga algo para resolverlos. Esta intervención se llama **solución del problema.** Se buscan soluciones rápidas y sencillas pero, con frecuencia, los problemas complejos requieren soluciones complejas. La solución de la mayor parte de los problemas bien estructurados es sencilla. Para encontrar el mínimo de una función cuadrática se usan la primera y segunda derivadas. La solución de problemas con estructura pobre no es obvia. ¿Cómo se puede reducir el hambre en el mundo? Una gran parte de la solución es la transformación de un problema con estructura pobre en uno bien estructurado.

Ackoff (1991) analiza cuatro enfoques a un problema. El primero, la **absolución,** ignora el problema y espera que desaparezca, lo que muy pocas veces es un buen enfoque. El segundo es la resolución. La **resolución** encuentra un solución aceptable usando el sentido común; la resolución casi siempre es mejor que la absolución, pero la respuesta puede no ser buena. La **solución** es su tercer enfoque. Utiliza métodos cuantitativos y experimentales para obtener la "mejor" respuesta bajo las condiciones actuales. El cuarto, la **disolución,** rediseña el sistema para eliminar la causa del problema. Este enfoque, si es posible y no muy costoso, es el preferido.

Para resolver un problema deben existir cinco condiciones (VanGundy, 1981). Debe tenerse lo siguiente:

1. Una diferencia entre el estado actual y el estado meta, es decir, que exista un problema
2. La conciencia de la diferencia, en la que se reconoce el problema
3. La motivación para disminuir la diferencia, esto es, el problema es importante para alguien y tiene un impacto, y se dedicarán recursos para resolverlo
4. La habilidad para "medir" el tamaño de la diferencia; se tiene una idea de la severidad del problema y se sabe si ocurre una mejora
5. La habilidad y los recursos para disminuir la diferencia; se cuenta con la metodología para resolver el problema y los recursos para llevar a cabo la solución

Si falta una o más de estas condiciones es poco probable que la solución del problema tenga éxito. Si estas condiciones existen, se puede proceder con la solución. Aunque no existe una mejor manera de resolver los problemas de estructura pobre, se presenta un marco de referencia que puede ser útil.

1.3 Analistas de problemas

¿Quién resuelve los problemas? La persona que tiene un problema o alguien contratado para resolverlo puede ser el **analista de problemas.** En el ambiente de producción, el analista puede ser un administrador, un analista de sistemas o un ingeniero industrial. Con frecuencia hay varios analistas de problemas trabajando juntos; para que la presentación sea más sencilla se usará el singular. En este libro, usted es el analista.

Debido a que los solucionadores de problemas son personas, no son infalibles. Los valores, tendencias y juicios personales afectan el proceso de solución. Si existe o no un problema depende del punto de vista de una persona, pero el hecho de reconocer que el punto de vista puede ser tendencioso debe minimizar su impacto.

El conocimiento y la experiencia de un analista de problemas también influyen. Si una persona tiene más herramientas, esa persona tendrá más opciones de solución. La experiencia enseña qué herramientas usar en ciertas situaciones e incluso ayuda a inventar nuevas opciones o a adaptar las conocidas a nuevas situaciones. Si una herramienta específica no forma parte del acervo de herramientas, ésta no se usará.

SECCIÓN 1 EJERCICIOS

3.1. ¿Qué es un problema?
3.2. Enumere los cuatro tipos de soluciones de Ackoff.
3.3. ¿Cuáles son las cinco condiciones que deben existir para resolver un problema?

2 ENFOQUE DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Existen muchos enfoques para resolver un problema. Uno general incluye la identificación del problema, la generación de soluciones y la elección de una de ellas. Se presenta un proceso de seis pasos, que se describe en la figura 3-1. Se da el marco general del proceso; los detalles se darán en secciones posteriores.

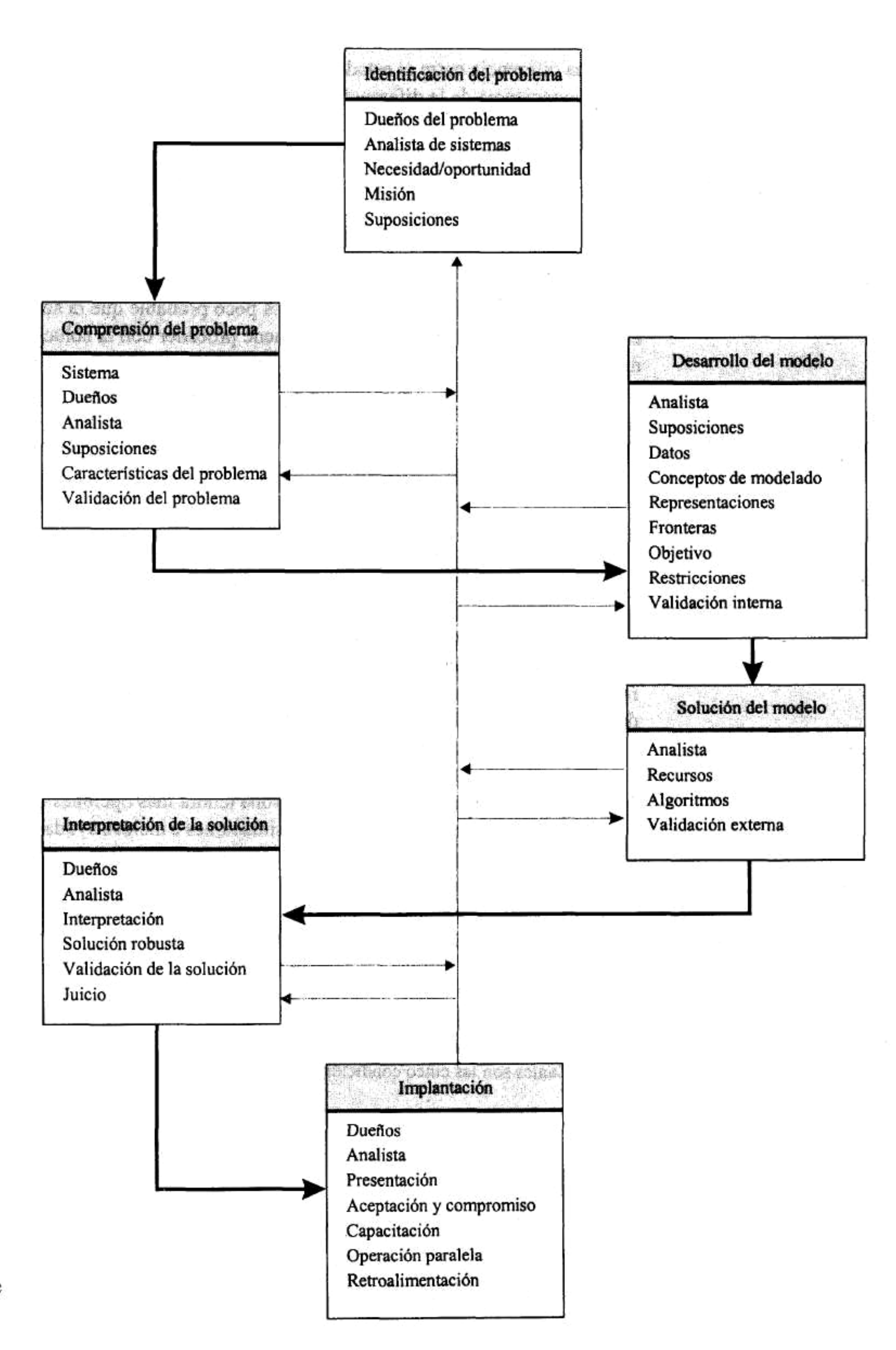


FIGURA 3-1
Una visión general del proceso de solución de problemas

El proceso comienza en la *identificación del problema* y procede a la *comprensión*, el *desarrollo,* etcétera. Esta secuencia está indicada por las líneas gruesas. No se puede saltar ningún paso. Es probable que no se complete con éxito algún paso; entonces debe regresarse a un paso anterior. Estos regresos se muestran con las líneas delgadas. Si no se completa el paso de *solución del modelo,* se regresa al *desarrollo del modelo, comprensión del problema* o *identificación del problema,* que se determina según el motivo por el que no se pudo obtener la solución. Al regresar a cualquier paso, deben realizarse los pasos siguientes.

El primer paso es identificación del problema, lo que incluye identificar a los dueños del problema y con ellos determinar la misión del mismo. En este paso se hacen las suposiciones. Una vez determinado el problema, el analista y los dueños deben comprenderlo; para ello se examina el sistema dentro del cual ocurrió, especificando las características del problema, lo cual incluye las metas y tal vez hacer más suposiciones. La validación asegura que más adelante se esté resolviendo el problema correcto. Si este paso no tiene éxito será necesario regresar a la identificación del problema. Una vez que el analista de problemas y los dueños están de acuerdo se desarrolla un modelo formal. Los conceptos de modelado y la disponibilidad de datos determinan una representación para el modelo. Después se usan fronteras, restricciones y objetivos para producir un modelo formal. Se valida el modelo para estar seguros de que hace lo que se quiere. El fracaso en este paso puede requerir ir de nuevo a la identificación del problema o bien a la comprensión del problema. Después de construir un modelo formal y recolectar los datos se usa un algoritmo adecuado para resolverlo. De nuevo, los resultados no satisfactorios obligan a regresar a algún paso anterior. Una vez que se tiene la solución del modelo, se interpreta considerando el problema real. Una solución robusta, la validación y el juicio llevan a la solución del problema. Si es necesario, se regresa a algún paso anterior para eliminar las diferencias. Por último se implanta la solución. La implantación comienza proponiendo una solución. Cuando ésta se acepta se asignan recursos para resolver el problema. Se capacita a las personas idóneas y se implanta en paralelo con el procedimiento anterior. Se debe supervisar la implantación para que el éxito sea constante.

Se presentará cada paso con cierto detalle. Algunos temas, como suposiciones y participación dei dueño, aparecen en varios pasos. A menos que exista alguna deferencia en ellos en algún paso específico, sólo se analizarán la primera vez.

SECCIÓN 2 EJERCICIOS

3.4. Enumere los pasos para la solución de problemas.
3.5. Analice la naturaleza no secuencial de la solución de problemas.

3 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Primero surgen los síntomas; con ellos debe hacerse un diagnóstico. El problema puede surgir a partir de una necesidad, una oportunidad, o ambas. El analista y los dueños desarrollan una misión del problema que determina qué necesidad debe satisfacerse. Para hacerlo, con frecuencia se requieren algunas suposiciones. No debe intentarse visualizar una solución en este momento; esto sólo restringirá las ideas sobre la identificación del problema. Este paso consiste en una interacción continua entre los dueños del problema y el analista, y el resultado es un enunciado inicial del problema.

La identificación del problema convierte un "caos" en un enunciado sencillo. Tentativamente, se describe el estado actual y el estado meta. Si una línea de producción fabrica muchos artículos rechazados por el cliente, el estado actual es una línea que produce artículos de baja calidad. El estado meta sería una línea que produce artículos perfectos.

La identificación es un paso importante en la solución de problemas. Un problema no reconocido no se puede resolver. Ackoff (1991) piensa que es mejor obtener una solución equivocada para un problema correcto que la solución correcta del problema equivocado. Las soluciones de un problema equivocado se ignoran, pero las respuestas equivocadas del problema correcto crean interés, se corrigen y se usan.

Dos orígenes de problemas son la necesidad y la oportunidad. Los problemas pueden estar controlados por cualquiera de ellos o por ambos; ocurre algo indeseable que necesita arreglarse. Con frecuencia, las quejas hacen que se reconozca un problema. Algunas veces es difícil reconocer problemas controlados por la necesidad. En 1962 la General Motors fabricó el 51% de los automóviles y camionetas vendidos en Estados Unidos. Para 1991 tenía sólo el 35% del mercado. Su incapacidad para responder a un mercado cambiante es un ejemplo clásico de problemas no reconocidos.

Aun cuando no haya quejas, puede tenerse un problema. No es suficiente tener clientes satisfechos; se puede querer mejorar la calidad para aumentar la competitividad. Esta situación está controlada por la oportunidad. ¡Si no está en quiebra, mejórala! La insistencia japonesa en la mejora continua es un ejemplo de solución de problemas controlados por la oportunidad. Para reconocer un problema de este tipo debe seguirse el consejo de Shaw: "sueño con cosas que nunca han existido y pienso, ¿por qué no?".

3.1 Misión del problema

La etapa más importante de la identificación del problema es determinar la **misión del problema.** La misión del problema es el propósito global, aquello que se quiere lograr. La misión se traducirá más adelante en metas y después en objetivos. Distintas misiones dan como resultado soluciones diferentes. Un problema puede tener varias misiones.

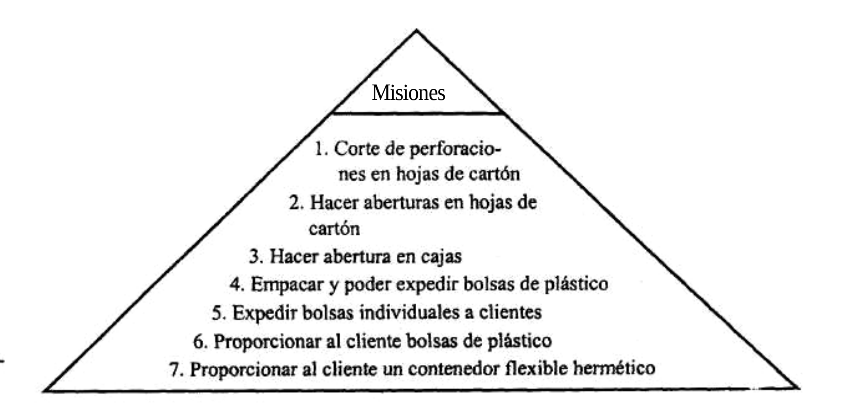


FIGURA 3-2
Jerarquía de las misiones del problema

Las misiones pueden verse como una pirámide con varios niveles. Cada nivel representa una misión diferente, comenzando por la más específica seguida de misiones cada vez más generales. Nadler e Hibino (1990) analizan una empresa que hace bolsas de plástico. Las bolsas se empacan en una caja de cartón. Un lado de la caja tiene una pestaña que se puede jalar para hacer una abertura. Cada bolsa se jala por esta abertura para sacarla de la caja. Actualmente, la empresa tiene problemas con el corte de las perforaciones en la hoja de cartón que se convierte en caja. Su lista de misiones está dada en la figura 3-2.

La primera misión es muy distinta de la última. El corte de perforaciones en las hojas restringe las soluciones posibles, mientras que proporcionar al cliente un contenedor flexible y hermético coloca al problema en una nueva perspectiva. Buscar una misión más general tal vez signifique un cambio mayor; en este caso la empresa puede cambiar por completo su línea de producto.

No siempre es lo mejor aspirar al logro de la misión más general. Las restricciones de tiempo y recursos, o incluso las decisiones políticas, pueden limitar la misión. Por ejemplo, empacar y expedir bolsas de plástico puede ser lo más lejos que se quiera llegar. Al elegir esta misión se elimina el problema original porque puede ser que ya no se necesiten las perforaciones en las hojas de cartón. Por supuesto, debe resolverse el problema de empacar y expedir las bolsas.

Definir la misión correcta evitará confundir los síntomas con el problema. La identificación del problema tiene mucho más en común con el diagnóstico que hace un doctor. El analista ve los síntomas y determina el enunciado correcto del problema. En una máquina de moldeo por inyección se rompió la llave que conecta un engrane con el eje principal. Después de romperse dos veces un mecánico supuso que la misión era evitar la rotura, por lo que la remplazó con una llave de acero reforzada. Por supuesto que no volvió a romperse pero el eje terminó con la apariencia de nudo.

La llave rota era un síntoma y no el problema. De hecho, la llave hacía su trabajo, protegía al eje y al engrane. La verdadera misión era encontrar la causa del exceso de fuerza aplicada sobre la llave. Una vez establecida la misión, un ingeniero de mantenimiento encontró y arregló el problema. Con frecuencia, es más difícil identificar el problema correcto que encontrar la solución.

Para diferenciar entre síntomas y causas, Ohno (1988) recomienda preguntarse ¿por qué? cinco veces. Cuando la llave se rompa pregunte por qué. Cuando se averigua la causa, continúe preguntando por qué hasta que se descubra el verdadero problema. Si el analista pregunta por qué al menos cinco veces, quizá encuentre el problema real.

Una vez que se ha elegido la misión correcta, la identificación del problema es más sencilla. Debe dedicarse suficiente tiempo a esta etapa. No intente incorporar soluciones en la identificación del problema, eso vendrá después. Observar lo que ocurre será útil. También la lluvia de ideas con un gi|upo de expertos puede ayudar a aclarar el problema.

3.2 Dueños del problema

Los **dueños del problema** son las personas que deben vivir con la solución. Sería poco usual en un ambiente de producción (y en muchos otros) tener un solo dueño. Muchas veces, dueños distintos tienen intereses diferentes en el problema e incluso diferentes metas. Debe revisar con cuidado las partes y las metas e involucrar *continuamente* a los dueños en el proceso de solu-

ción. No intente encontrar un culpable. Haga del problema un enemigo común para que los dueños trabajen con usted y no en su contra.

No lograr la participación continua de los dueños puede ser desastroso. Existen muchas historias de horror sobre analistas de problemas que desarrollan una descripción inicial del problema y se van a su oficina a resolverlo. Después de gastar tiempo, esfuerzo y recursos presentan su solución a los dueños sólo para llegar a la conclusión de que el problema que resolvieron en realidad no existe. Un ejemplo típico es entregar una tarea que no era la que quería el profesor.

Es usual que los dueños sólo reconozcan los síntomas y no el problema, lo cual bloquea la identificación del problema. Es necesario un buen diagnóstico y esto requiere el diálogo continuo con los dueños.

3.3 Suposiciones

Al identificar el problema casi nunca se conocen todos los hechos, de manera que deben hacerse suposiciones. Si está trabajando con problemas bien estructurados, las suposiciones pueden no ser necesarias. Sin embargo, las relaciones entre las diferentes partes de la mayoría de los problemas son inciertas; esto requiere que el analista haga suposiciones sobre ellas.

Es muy importante establecer las suposiciones *explícitamente.* Así, cada uno puede ponerlas en duda y comentarlas. Las suposiciones explícitas nos recuerdan que debe verificarse su influencia en la solución. Si una suposición es cuestionable y tiene un gran impacto en la solución, intente usar los experimentos preliminares para justificarla o cambiarla.

En ocasiones deben hacerse suposiciones cuestionables a pesar de todo. Es mejor hacer una suposición explícita cuestionable que no establecer una suposición. El análisis de sensibilidad que se estudiará más adelante puede determinar el efecto de las suposiciones. De cualquier manera, las suposiciones deben ser "razonables", es decir, que encajen dentro del ambiente del problema general. Si es posible, se justifican por observación, evidencia o datos empíricos o el juicio de los dueños.

3.4 Enunciado inicial del problema

Una vez que se identifica un problema, se escribe un enunciado "formal" del mismo. Se incluye una descripción de la misión en uno o dos renglones y una breve descripción del estado actual y el estado meta. No se incluyen restricciones, y no se hace con detalle. Se enumeran todas las suposiciones, de preferencia en letras mayúsculas y gruesas. El siguiente paso es entender el problema.

Ejemplo 3-1. Identificación del problema MaTell. MaTell hace teléfonos. Por ahora hace tres productos; un teléfono de mesa, uno de pared y una contestadora. Los tres productos se hacen sólo en la planta de Vinings. Muchos clientes que quieren estos productos no pueden comprarlos porque no están disponibles. El departamento de producción de Vinings sostiene que está haciendo tantos productos como es posible.

¿Se tiene un problema? Si así es, ¿está controlado por una necesidad o por una oportunidad? Poder vender más productos beneficiaría a la compañía, por lo que hay una oportunidad. No hacer

nada puede causar después un problema controlado por la necesidad. Si se tienen demasiados clientes insatisfechos, pueden cambiar a otras marcas y puede desaparecer el mercado de MaTell.

¿Cuál es la misión del problema? Una misión puede ser proporcionar más productos para que se pierdan menos ventas. Preguntar por qué se quiere perder menos clientes lleva a la misión más general de aumentar el porcentaje de mercado. La pregunta de por qué se quiere incrementar el porcentaje de mercado puede llevar a la misión de ganar más dinero. Por supuesto es posible establecer otras misiones, pero con el fin de ejemplificar sólo se generarán éstas. Este problema requiere una solución rápida por lo que se elegirá la misión de proporcionar más productos. El alcance es menor, con mayor enfoque y adecuado para el corto plazo. Tal vez también se quieran explorar problemas a largo plazo con misiones como incrementar el porcentaje de mercado o ganar más dinero.

¿Quiénes son los dueños de este problema? Primero, debe pensarse en los clientes, porque su insatisfacción está creando el problema. Debemos estar seguros de que existen clientes que quieren el producto y no lo están obteniendo. Algunas encuestas e investigaciones de mercado pueden responder a esta pregunta. Puede que el departamento de mercadotecnia ya haya hecho esto. Aunque los clientes son los dueños más importantes de este problema, a ellos no les preocupa el proceso de resolverlo, sólo los resultados. El puente natural hacia el cliente es la mercadotecnia, que debe considerarse un dueño en esta etapa. Debe designarse a alguien de esta área para trabajar con el analista de problemas.

Al resolver este problema, deben hacerse varias suposiciones. Primero se supone que existe una oportunidad. Mercadotecnia y los clientes pueden verificar esta suposición. También debe suponerse que la demanda de estos productos permanecerá constante o se incrementará; si esta suposición no es cierta no es necesario proporcionar más productos. Por último, existe la suposición de una amenaza implícita por parte de los competidores; si no se hace algo al respecto, alguien más lo hará. En resumen,

- Se pueden vender más productos si están disponibles.
- La demanda continuará en los niveles actuales o se incrementará.
- Los competidores venderán productos a los clientes que no puedan obtener los productos.

Esto lleva a un enunciado inicial del problema:

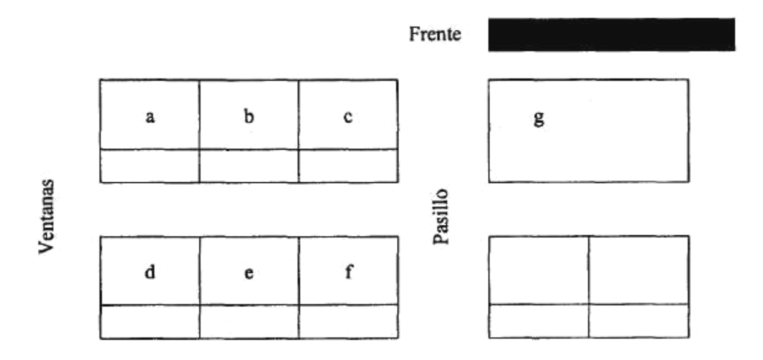
Estado actual: algunos clientes que quieren productos no los pueden obtener.
Estado meta: proporcionar un producto a todos los clientes que quieran uno.
Problema: ¿cómo se puede proporcionar un producto a cada uno de los clientes?

SECCIÓN 3 EJERCICIOS

3.6. Analice los síntomas contra los problemas.
3.7. Mencione dos fuentes de problemas.
3.8. ¿Cuál es la relación entre la misión del problema y los cuatro tipos de soluciones de Ackoff?
3.9. ¿Cuál es el punto más importante al tratar con los dueños del problema?
3.10. ¿Por qué son necesarias las suposiciones?
3.11. ¿Cuál es el peligro al hacer suposiciones?
3.12. La pizza de The Palace es la comida tradicional el día del juego en una pequeña área universitaria. Shoshana es una de las 16 estudiantes que reparten pizza los fines de semana que hay juego. Este trabajo es su única fuente de ingresos. Como muchos alumnos regresan del juego, cuando ella regresa de una entrega tiene otra esperándola. Su salario por hora es bajo, pero junta un promedio de $20/hora en propinas. Si maneja más rápido puede hacer más entregas y ganar más propinas. Sin embargo, el costo de operar su automóvil aumenta conforme maneja más rápido. Los experimentos muestran que manejar a 25 mph (millas por hora) cuesta $0.25/milla, a 30 mph cuesta $0.30/milla y a 40 mph cuesta $0.40/milla.

a) ¿Cuáles son las misiones posibles?
b) ¿Cuál escogería? Explique.
c) ¿Quiénes son los dueños?
d) Escriba un enunciado inicial del problema.

3.13. (Este problema es de Lumdsdaine y Lumsdaine copyright © (1995) reproducido con permiso de The McGraw-Hill Companies, Inc.) Siete pasajeros acaban de abordar un Boeing 747 para un vuelo traspacífíco. Encuentran sus lugares asignados y se sientan. La figura siguiente proporciona un bosquejo de los asientos a los que se refiere este problema.



Para este vuelo de 14 horas, las personas, sus asientos asignados y sus necesidades y deseos son los siguientes:

a) Un hombre coreano que habla un poco de inglés tiene el primer asiento de la ventana (a).
b) Su esposa que parece enferma está en el asiento medio enfrente (b).
c) Un filipino alto que habla inglés y lleva una maleta grande y se rehusa a guardarla en el lugar adecuado está en el asiento delantero en el pasillo (c) pero quiere un asiento más atrás.
d) Una mujer coreana que no habla inglés tiene el asiento de la ventana en la segunda fila (d). Lle va un paquete grande que no cabe debajo del asiento de enfrente. Lo deja en el espacio para las piernas y lo cubre con una manta y su bolso. Por necesidad sus piernas se extienden al espacio del asiento medio.
e) Un empleado de gobierno gordo está apachurrado en el asiento medio (e).
f) Una mujer estadounidense de edad media con muletas por un pie roto tiene el asiento del pasillo (f). Encuentra que en este lugar le será imposible subir su pie al pequeño banco de campamento que trajo para eso.
g) El hijo de la mujer, un chico flaco muy alto con piernas largas, tiene el asiento de enfrente (g) al otro lado del pasillo (atrás de la partición del baño). Él intercambia asientos con su madre para darle más espacio para su pierna. Sin embargo, no es suficiente para subir su pie al banco.

La aeromoza ha encontrado un asiento para el filipino en la parte de atrás del avión lleno. La pareja coreana estaba encantada al principio pero encuentra que los descansabrazos de los asientos de enfrente no se pueden subir, de manera que la esposa enferma no puede recostarse.

a) ¿Cuáles son las misiones posibles?
b) ¿Cuál de ellas elegiría? Explique.
c) ¿Quiénes son los dueños?
d) Escriba un enunciado inicial del problema.

4 COMPRENSIÓN DEL PROBLEMA

A partir del enunciado inicial del problema, se refina la comprensión del mismo. Como los problemas no existen en el vacío, el analista de problemas debe entender de qué manera encaja el problema en su ambiente. Se debe describir el sistema dentro del cual ocurre. Una vez que se determinan las fronteras del problema, el analista y los dueños identifican las características. También obtienen una misión más específica identificando las metas de solución. En este paso pueden ser necesarias nuevas suposiciones, que lleven a una comprensión más profunda. Los problemas deben validarse para asegurar que se quiere resolver el problema correcto. Los métodos para la comprensión del problema son similares a los usados para su identificación, pero a un nivel más detallado. Puede ser necesario redefinir el sistema, hacer nuevas suposiciones o incluso regresar a la identificación del problema. El resultado de la comprensión del problema es un enunciado detallado del mismo.

4.1 La perspectiva de sistemas

Un sistema es una colección de componentes interactivas; su función no la puede realizar ninguna de las componentes. Las máquinas son una componente del sistema de producción. Por sí misma, una máquina no puede hacer un producto terminado, pero acoplada de manera correcta con otras máquinas, personas y materias primas se convierte en un sistema capaz de hacer un producto. La máquina también es un sistema hecho de componentes, por ejemplo, energía eléctrica, herramientas, etcétera. Así, el hecho de que algo sea un sistema o una componente depende del problema particular. Los problemas con frecuencia ocurren en la forma en que las partes del sistema interactúan unas con otras. Deben entenderse los problemas dentro del marco de referencia de un sistema.

El análisis es una forma de estudiar un sistema. El sistema se desglosa y se estudia cada componente por separado para ver cómo funciona. Después, el conocimiento sobre las componentes se combina para saber más sobre el sistema, lo cual por lo general nos dice *cómo* trabaja ese sistema.

La síntesis es otra manera de ver un sistema. La síntesis ve el sistema como una componente de un sistema más grande, e intenta explicar el comportamiento de éste. Después se puede dar una explicación del sistema original según funciona dentro del sistema más grande. En lugar de decirnos cómo opera el sistema, la síntesis habla *de por qué* opera como lo hace.

La figura 3-3 muestra la diferencia entre el análisis y la síntesis. Suponga que el problema ocurre dentro del sistema descrito por la línea gruesa continua. El análisis está representado por la flecha que apunta a la izquierda. Observa el interior del sistema para ver cómo interactúan las componentes. Por otro lado, la síntesis, representada por la flecha que va hacia afuera del sistema, ve el sistema como una componente de un sistema más grande, mostrado con la línea discontinua. Al considerar su interacción con las componentes del sistema más grande se puede descubrir por qué el sistema funciona como lo hace.

Cuando se examina un problema dentro del marco de los sistemas, las preguntas importantes son quién, qué, por qué, cuándo, dónde y cómo. ¿Quién lo hace; qué hacen; por qué lo hacen; cuándo lo hacen; dónde lo hacen y cómo lo hacen? Estas preguntas ayudan a obtener una mejor definición del estado actual.

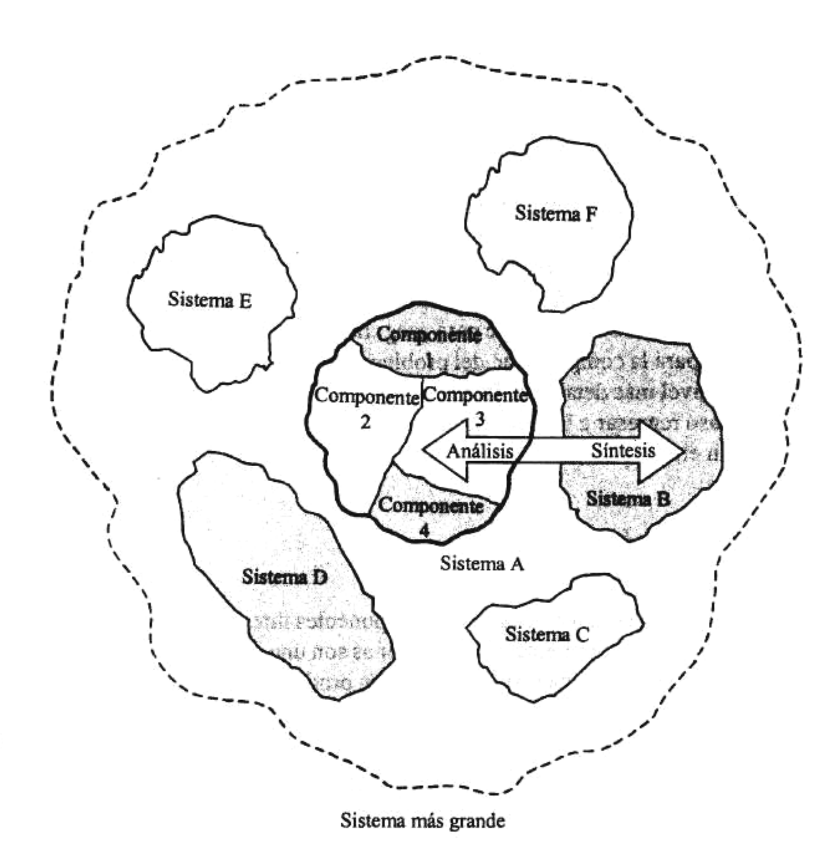


FIGURA 3-3
Análisis y síntesis de un sistema

4.2 Metas

Dado el enunciado inicial del problema y una mayor comprensión del mismo, se define la **meta** de solución. La misión es el propósito general, pero la meta debe constar de uno o más logros que llevarán al cumplimiento de la misión. Si la misión es tener a los clientes satisfechos, la meta puede ser mejorar la calidad del producto o servicio. Otras metas comunes pueden ser reüücir el tiempo para realizar una tarea o proporcionar un producto o reducir el costo asociado. No hay necesidad de describir las metas con todo detalle, sólo establecerlas de una manera general.

4.3 Características del problema

El marco de tiempo en el que existe un problema es importante. Si el problema es de una sola vez, la solución debe darse antes de que el problema desaparezca o cambie. Por ejemplo, debe determinarse la mejor manera de distribuir una instalación de producción antes de usarla. De manera similar, si un administrador necesita saber cuántos empleados contratar para el siguiente mes, obtener una respuesta dentro de dos meses no le ayudará. Entonces el tiempo disponible para resolver un problema determina el enfoque que debe usarse para resolverlo.

¿Se trata de un problema recurrente o de una situación de una sola vez? Los problemas recurrentes con frecuencia requieren más recursos. Los informes, la recolección de datos y otra infraestructura casi siempre son más elaborados que para los problemas de una sola vez.

También es necesario determinar un nivel apropiado de detalle para el problema. Una lechería que tuviera que decidir cuánta leche sin grasa, con 2% de grasa y entera producir la siguiente semana no necesitaría saber la cantidad de leche que da una vaca, sólo el total para todas las vacas. La decisión sobre qué vacas cruzar sí requiere saber los rendimientos individuales.

Después se intenta determinar si alguna ley física controla parte del problema. La conservación de la materia y la ley de la gravedad son leyes típicas. En los sistemas de producción las leyes físicas casi nunca aparecen como problema. Las políticas de la compañía por lo general ponen más restricciones sobre las funciones del sistema. No deben incluirse restricciones políticas en este momento; no son leyes físicas absolutas.

Las características y el impacto del problema determinan cuánto tiempo y esfuerzo se pueden dedicar a la solución del problema. Los problemas importantes con un horizonte de tiempo lejano valen el tiempo y el esfuerzo. Sin embargo, si el rendimiento potencial es pequeño, se quedará en soluciones "rápidas" o no se resolverá el problema. Los métodos rápidos también pueden ser acertados para problemas importantes con un horizonte de tiempo corto.

4.4 Validación de la comprensión

La comprensión personal de problema es una abstracción del problema real. Si se entiende el problema real, la abstracción debe captar sus características importantes. Debe hacerse un esfuerzo para asegurar esto; es decir, para validar la comprensión del problema.

No es sencillo validar la comprensión. Se intenta describir el problema a los dueños. Si no se puede, es poco probable que se haya entendido. Ponga en duda de manera crítica cada parte de la descripción del problema. Es útil que alguien más cuestione la comprensión del problema. Si no se puede validar la comprensión, se regresa al paso de identificación del problema.

4.5 Enunciado del problema

Ahora se puede escribir un enunciado del problema más preciso y detallado. Después de estudiarlo más a fondo, es posible que se haya revisado la misión o se hayan modificado las suposiciones. Todos los cambios deben documentarse.

Igual que antes, los dueños deben participar. Es útil que alguien externo también participe ya que ayudará a evitar el síndrome de "los árboles no me dejan ver el bosque". No es bueno apresurarse en esta etapa para llegar a obtener una solución. El tiempo que se dedique aquí ahorrará tiempo y esfuerzo perdidos más adelante.

En este punto debe formularse un enunciado del problema de manera más formal, casi siempre desarrollando un modelo formal. Este paso se estudiará en la siguiente sección.

Ejemplo 3-2. Comprensión del problema de MaTell. Existen muchas formas de proporcionar más productos a los clientes. Se puede construir una nueva planta, ampliar la de Vinings o subcontratar con otra compañía la fabricación de los productos. No obstante, los primeros dos enfoques tomarían mucho tiempo y el tercero puede tener serias complicaciones en cuanto a calidad, tecno-

logia compartida, etcétera. Como resultado, la meta debe ser aumentar la producción en la planta de Vinings.

Para entender el problema de MaTell debe observarse desde la perspectiva de los sistemas. Un sistema es la operación completa de MaTell. MaTell hace muchas cosas además de los tres productos específicos en la planta de Vinings. Debido a que el objetivo es aumentar la producción total de la planta de Vinings, nos concentraremos en el sistema de producción real.

Físicamente, la materia prima se procesa para obtener las componentes en un departamento de fabricación y después se ensamblan en otro departamento. Los productos terminados se entregan a los distribuidores, que los venden a los clientes. No se han tenido noticias de problemas con los proveedores, la distribución o las ventas, de manera que nos concentraremos en la fabricación y el ensamble.

Por ahora se están fabricando 15 000 teléfonos de pared, 17 000 teléfonos de mesa y 5000 contestadoras a la semana. La planta trabaja 3 turnos de 8 horas al día y opera los 7 días de la semana. Los registros de producción muestran que la fabricación está ocupada 135 horas por semana, y el ensamble trabaja 163 horas por semana. Como se tienen 168 horas disponibles por semana (7 días x 24 horas/día), parece que el ensamble es el cuello de botella.

En este punto se identifica un nuevo dueño del problema: el departamento de producción. Las juntas de trabajo con ellos verifican que el ensamble limita el número de unidades fabricadas. En esta etapa es común saltar a la solución de agregar capacidad al ensamble. Sin embargo, esta acción puede no ser la mejor solución, porque la industria telefónica es muy competitiva y un incremento en costos podría repercutir en las ventas. Deben estudiarse otras dos estrategias: usar la capacidad de una manera más efectiva o reducir el tiempo de ensamble de un producto.

Exploremos la idea de usar la capacidad de manera más efectiva. Ahora, la producción se planea según una proyección de la demanda futura. Si no es posible producir toda la demanda, se fabrica un porcentaje fijo de los tres productos. Como los tres productos tienen tiempos de ensamble distintos, podrían hacerse más productos con un plan de producción diferente y el resultado sería que más clientes compran los productos. Además un nuevo plan trae al departamento de planeación como los nuevos dueños.

El impacto de este problema es grande. Mercadotecnia piensa que se pierden entre el 10 y el 15% de las ventas. No sólo se pierden los ingresos de esas ventas sino que lámala voluntad de un cliente puede influir en otros para que no compren los productos.

Existen varias características importantes de este problema. Los tiempos son importantes; se cree que si no se pueden llevar más productos a los clientes dentro de dos meses, los competidores se quedarán con el mercado. Volver a ganar a los clientes perdidos es mucho más difícil que conservarlos. El problema es recurrente porque se tiene que planear la producción cada semana. Para llegar al nivel correcto de detalle, ha de considerarse cada uno de los tres productos; sin embargo las áreas de ensamble y fabricación no tienen que considerarse a nivel de máquinas individuales. Las leyes naturales no son importantes en este caso.

Para validar la comprensión del problema debe asegurarse que esa comprensión esté de acuerdo con todos los dueños. Aunque esto parezca obvio, es sumamente importante y con frecuencia se ignora.

Existen varias suposiciones adicionales que deben hacerse aquí:

- La información en la que se basó el análisis era correcta.
- No proporcionar una solución antes de dos meses tendrá un efecto negativo para MaTell.
- Se puede usar la capacidad de ensamble de manera más efectiva con una mejor planeación.

Más adelante, un análisis más completo ayudará a validar estas suposiciones.

Ahora se cuenta con un enunciado del problema más detallado: ¿cómo se puede usar la capacidad de ensamble de manera más efectiva para proporcionar más productos a los clientes?

SECCIÓN 4 EJERCICIOS

3.14. Enumere los pasos para comprender mejor un problema.
3.15. ¿De qué manera ayudan la síntesis y el análisis en la comprensión del problema?
3.16. ¿Cuáles son las diferencias entre las metas y la misión del problema?
3.17. Enumere las características del problema. ¿Por qué son importantes?
3.18. ¿Cómo se valida la comprensión del problema?
3.19. Considere el problema del reparto de pizzas.

a) Valide su comprensión y describa cómo lo hizo.

b) Escriba un enunciado detallado del problema.

3.20. Considere el problema de asignación de asientos en el avión.

a) Valide su comprensión y describa cómo lo hizo.
b) Escriba un enunciado detallado del problema.

5 DESARROLLO DE UN MODELO

En este paso se convierte un enunciado detallado del problema en un modelo formal. Un **modelo** es una representación de algo. El analista utiliza los datos disponibles, los conceptos de modelado y las suposiciones para elegir un tipo de modelo. Después, los datos específicos y las fronteras del problema ayudan a generar un objetivo y las restricciones que se aplican al modelo. Las suposiciones afectan al modelo. A continuación se propone un modelo y se valida su estructura, lo que asegura que el modelo funciona como debe. Si no se tiene éxito, se regresa a cualquiera de los pasos anteriores. Eventualmente se establece un modelo formal.

Un modelo puede ser formal o quizá sólo estar en nuestra mente. Una buena práctica es establecer el modelo de manera explícita. El enunciado preciso permite que todos los involucrados lleguen a un acuerdo sobre lo que se está haciendo. Se presentarán varios tipos de modelos, seguidos por las fuentes y el uso de los datos; después se estudiará el modelado. De nuevo debe incluirse a los dueños y establecer claramente las suposiciones. Durante este paso puede ser necesario regresar a algún paso anterior.

5.1 Representaciones de modelos

Los modelos pueden ser formales o informales, cualitativos o cuantitativos. Se usan para probar una alternativa, para predecir el comportamiento de un sistema, para determinar la mejor entre muchas alternativas o para explorar preguntas de "qué pasa si". En general se pueden probar más alternativas con un modelo que mediante la experimentación directa. Se explicarán brevemente los modelos icónicos, análogos y simbólicos.

Los **modelos icónicos** son representaciones físicas que casi siempre tienen una escala diferente que lo que representan. Las pruebas en túneles de viento de modelos de aviones a escala son menos costosas y toman menos tiempo que construir pruebas para los aviones reales. Por tradición, los ingenieros industriales usan modelos icónicos de edificios y plantillas de máquinas para hacer estudios de distribución de planta, por ejemplo, los sistemas CAD. Es sencillo explicar un modelo icónico porque se ve como el real.

Los **modelos análogos** se comportan de la misma manera que los sistemas pero no se parecen. Un diagrama de flujo que muestra el flujo de información en un sistema de producción es un modelo análogo. En los pasos de la solución de problemas se usan los sistemas análogos. Históricamente, los flujos en los sistemas se modelaban mediante circuitos eléctricos, por lo fácil que era calcular los flujos de corriente en ellos.

La clase de los **modelos simbólicos** es importante. Como su nombre lo dice, un sistema se representa por símbolos. Esta clase incluye modelos gráficos, tabulares y matemáticos.

Si el modelo es sencillo, se puede usar una tabla o una gráfica como modelo. La rapidez contra el número de productos aceptables puede representar la salida de una máquina en la planta. Esta relación se puede mostrar en forma de tabla o gráfica, o incluso como una ecuación matemática. Las hojas de cálculo son útiles para este tipo de modelos.

Los sistemas demasiado complejos para una tabla o una gráfica pueden usar modelos más complicados. Los modelos de simulación que incluyen relaciones entre sus componentes son modelos simbólicos. Con frecuencia las relaciones son probabilísticas y pueden no estar definidas con la precisión que se usa en los modelos matemáticos. Los modelos matemáticos captan las relaciones entre las componentes usando ecuaciones matemáticas. Las formulaciones de programación lineal son modelos matemáticos típicos. Los cambios en los datos de entrada por lo general no afectan la estructura del modelo, sólo la solución; esto hace que la utilización repetida de los modelos sea sencilla.

5.2 Datos

Con frecuencia se necesitan datos para identificar y entender un problema. En particular, los datos se usan para validar las suposiciones, estimar los parámetros del modelo y validar el modelo, y casi siempre se recolectan en cada paso del proceso de solución del problema. La disponibilidad de datos puede indicar el tipo de modelo que se debe usar.

Los datos representan características de personas, objetos o eventos. Ejemplos de datos serían el número de horas-máquina disponibles en el departamento de terminado; el número de unidades que produce un trabajador en un turno; el número de galones de petróleo crudo necesarios para producir un galón de queroseno, y el costo para hacer una unidad de producto en la planta de Salinas y mandarla a Los Ángeles. Algunos datos pueden estar en función de otros, pero se puede dar valores a todos los datos antes de resolver el problema.

Los datos no son información; la información describe o explica los datos. El número de unidades producidas durante un turno es un dato y el promedio para muchos turnos es información. Debe tenerse cuidado al extraer información a partir de los datos; alguna información no se puede conocer con exactitud. Un ejemplo es el número de clientes que llegará mañana a un restaurante entre las 11:00 y las 12:00 horas. En este caso se hace una estimación, dentro de ciertos límites de exactitud. El costo de sobrestimar puede no ser igual al costo de subestimar, de modo que deben tomarse decisiones congruentes.

Los datos se usan para obtener información. *No se recolectan datos sólo por tenerlos.* La recolección de datos es, con frecuencia, la parte más cara de la solución del problema. Si no proporcionan la información necesaria para resolver el problema, no deben recolectarse. Muchos proyectos comienzan intentando obtener todos los datos posibles, casi siempre a un costo alto en tiempo y dinero. Antes debe determinarse qué datos son necesarios para la solución y sólo recolectar ésos.

Un punto de vista pesimista es que casi nunca se dispone de datos y cuando se tienen están en la forma equivocada. Si por casualidad los datos están en la forma correcta, no son confiables. De manera más realista, pocas veces se contará con todos los datos que se desean, o los que se necesitan. La disponibilidad de datos puede indicar qué tipo de modelo usar.

¿En dónde se obtienen los datos? La respuesta a esta pregunta depende de los datos. Los registros de la compañía, las personas, el gobierno y las cámaras de comercio son fuentes potenciales.

Tal vez los registros de la empresa sean la mejor fuente de datos. Estos registros incluyen datos contables, estándares, reportes de ventas e inventarios, reportes financieros, dibujos de ingeniería y copias o propaganda de los productos. Asegúrese de que entiende qué son estos datos antes de usarlos. Por ejemplo, un contador puede tener tres o cuatro maneras de determinar el valor de una unidad de producto en inventario.

La gente es otra fuente de datos. Debe tenerse cuidado de obtener hechos y no opiniones cuando se trata con personas. Los dueños del problema son una fuente de datos al igual que los consumidores, los vendedores y aun los competidores. Las entrevistas y los cuestionarios son dos maneras de obtener información de las personas, pero las preguntas deben diseñarse bien para que los datos proporcionen información útil.

Los gobiernos y las cámaras de comercio con frecuencia proporcionan datos; algunos informes producidos por el gobierno contienen datos útiles. Los informes de investigación y las publicaciones también son fuentes de datos al igual que las revistas y boletines de las cámaras.

El costo de obtener datos varía mucho dependiendo de la fuente. La recolección de datos es cara, pero si existe una base de datos puede tener un costo bajo. Si el costo de los datos es demasiado alto, puede ser que haya que cambiar el modelo para que no sean necesarios. Además, si no se pueden obtener los datos antes de que el problema tenga que resolverse, el beneficio sería nulo.

Los datos deben reflejar el fenómeno físico; esto se conoce como integridad de los datos. Si los datos muestran que un producto necesita dos unidades de una componente específica, debe usar dos, no una ni tres. La pérdida de integridad en los datos ocurre de varias maneras pero, por lo general, se trata de un problema al introducirlos o uno de exactitud. Debe controlarse la introducción mediante las técnicas estándar de procesamiento de datos.

Los datos deben ser exactos y la exactitud requerida debe estar de acuerdo con el problema. Para determinar cuántas piezas producir el mes próximo, no es necesario conocer el tiempo que toma hacer una pieza con seis lugares decimales. Si existen varios tipos de datos, los datos menos exactos determinan la exactitud del modelo. Una vez desarrollado un modelo se puede determinar la manera en que la variabilidad de los datos afecta su solución.

Los datos pueden no ser lo suficientemente exactos. En un almacén, las lectoras de código usadas para sacar cajas de estambre para su embarque tienen una exactitud del 99.9%. Cada camión puede llevar alrededor de 250 cajas, de manera que alrededor de uno de cada cuatro tiene una caja equivocada —lo que ya no se considera un buen servicio—.

No importa de dónde vengan los datos, no se debe confiar en ellos sin verificarlos. El primer trabajo de un ingeniero industrial era la distribución de un área de almacén. Después de obtener los planos dibujó la distribución y preparó una orden de trabajo para que pintaran las líneas en el piso. Una vez pintadas, el ingeniero visitó el área. Se sorprendió al ver columnas justo a la mitad de los pasillos de 12 pies. Habían renovado la construcción y nadie había actualizado los planos; estaban totalmente equivocados. Si el ingeniero hubiera tomado medidas y las hubiera comparado con los planos el problema se habría evitado.

Ponga atención si sólo hay una fuente de datos. Si no se verifican por observación u otra fuente, son datos cuestionables. Planee usar análisis de sensibilidad sobre los valores de los datos al generar soluciones. Además, mientras más alejada esté la fuente de datos de la planta, más cuestionables serán.

5.3 Conceptos de modelado

Modelar es un arte; no existe una receta que nos diga cómo hacerlo. Se cuenta, sin embargo, con algunos conceptos que pueden ayudar. Se presentan algunos de ellos aquí.

Es imposible entender por completo la mayoría de los problemas. Existe mucha incertidumbre, por lo que pueden ser válidos varios modelos del problema. La persona que modela debe desarrollar el modelo correcto más sencillo que entienda el dueño.

Construir un modelo es en sí una tarea que vale la pena, ¡aun sin la solución! Modelar requiere una comprensión exhaustiva del problema, lo cual aumenta la visión que se tiene. Folklore insiste que el desarrollo del modelo proporciona el 90% del valor de un proyecto de simulación. De hecho, cuando se "resuelve" el modelo, los analistas de problemas muchas veces encuentran que la solución es obvia debido a lo bien que entienden el problema.

Además de usar modelos para resolver un problema específico, se usan para conocer mejor las operaciones actuales. Ackoff (1962) analiza la optimización retrospectiva, en la que se usa el modelo para extraer datos de una simulación dada. Este modelo es similar a la ingeniería inversa, donde se desarma un producto para deducir cómo está hecho. En el modelo de elasticidad de precios clásico, un parámetro estimado da la relación entre el precio de un bien y la cantidad vendida. Este modelo se usa comúnmente para predecir las ventas dado un precio de venta. No obstante, se puede usar para determinar el valor de un parámetro extraído insertando el precio real y las ventas.

Quien desarrolla el modelo debe preguntar si el problema se ajusta a un modelo estándar, como una red de proyectos. Si así es, la tarea de modelar es mucho más sencilla. Simplemente se definen los datos necesarios, se recolectan y se aplica el algoritmo de solución para ese modelo. Si el problema no se ajusta a un modelo estándar, se intenta simplificar las suposiciones para que se ajuste. Éstas no deben ocultar información importante sobre el problema.

Citando a Einstein, "los modelos deben ser tan sencillos como sea posible, pero no más sencillos". Se comienza con un modelo general y se agrega detalle conforme se necesite; los modelos sencillos son más generales y dan una visión más amplia. Un mayor detalle requiere más datos o suposiciones que hacen el modelo más "exacto" pero menos general. Es más fácil que los dueños entiendan los modelos sencillos.

Para determinar los factores clave y las interacciones entre las componentes del problema, se intenta volver a establecerlo para darle otra perspectiva. Si es posible, se dibujan diagramas o se construyen tablas que resalten los aspectos importantes.

Los problemas complicados se descomponen en partes sencillas. Se trata de reconocer las partes del problema que sean estándar y manejarlas primero. Cuando se comprenden éstas, se regresa para incluir las partes no familiares en el modelo. Con frecuencia es difícil para los novatos ignorar algunas partes. Recuerde que las partes ignoradas se incluirán más adelante.

Se definen notación, parámetros y variables con cuidado y precisión. Se usan para expresar las relaciones que existen entre las partes del problema, y se analizan con alguien que pueda hacer comentarios críticos. Se definen las leyes físicas de soporte apropiadas. También se bus-

can las leyes empíricas que puedan ayudar a simplificar o proporcionar conocimientos para el modelo.

Ahora se estudiarán algunas componentes comunes de los modelos.

5.3.1 Fronteras

El primer paso para describir el problema es determinar sus partes importantes. Debe incluirse la información relevante y deben dejarse fuera los detalles irrelevantes con el fin de determinar las **fronteras** que contienen el problema. No necesariamente se excluye todo lo que está afuera de estas fronteras, pero se maneja como insumos dados para el problema.

Por ejemplo, si está bajo consideración el equipo y la distribución de planta para la instalación de producción, la frontera puede ser la construcción de paredes. La condición de la economía del país puede afectar la contratación pero no se incluiría en el plan para determinar cuántos empleados contratar el mes próximo en una planta dada.

Debe tenerse cuidado al definir las fronteras. La solución de un problema en un departamento específico en una planta que ignora la interacción con otros departamentos puede ser desastrosa. Como caso extremo, suponga que se programa la producción de artículos en el departamento de lijado para minimizar el tiempo ocioso. Este programa puede causar problemas al departamento de pintura, con pérdidas para toda la empresa.

La definición de fronteras puede ser dinámica. Al avanzar en el proceso de solución puede ser necesario ampliarlas. Inversamente, algo que inicialmente se pensó que era importante puede no serlo y esto puede cambiar la frontera.

5.3.2 Objetivos

Una vez que se establecen tentativamente las fronteras, se determinan los **objetivos.** Un objetivo es el refinamiento de una meta. Debe ser medible de manera que se pueda evaluar el progreso. Si la meta es mejorar la calidad de un producto, el objetivo puede ser disminuir el número de unidades defectuosas a 10 en 1 000 000 o 10 partes por millón (PPM).

Debe tenerse la certeza de que los objetivos reflejan con exactitud las metas. Las personas están siempre dispuestas a satisfacer medidas de desempeño aun con resultados no deseados. Una compañía decidió hacer todas las entregas a tiempo. Al acercarse el día de la entrega, se mandaba un camión que contenía sólo una o dos cajas de artículos en lugar de arriesgar una entrega tardía. La compañía no entendía por qué habían aumentado tanto sus costos de embarque. Aunque el reparto oportuno es importante, deben considerarse otros factores, como los costos de envío.

5.3.3 Restricciones

Cuando se tienen recursos ilimitados, es sencillo resolver casi todos los problemas, pero por lo general se tienen limitaciones o **restricciones** sobre lo que se puede hacer. Estos límites pueden ser sobre personas, tiempo, conocimientos, datos, capacidad, tecnología, dinero u otros recursos. Es importante definirlos. Ignorar una restricción da como resultado una solución que no funcionará; incluir restricciones no existentes limita las alternativas de solución.

La validez de las restricciones debe cuestionarse. Con frecuencia, la gente piensa que algo que se viene haciendo de cierta forma por mucho tiempo *debe* hacerse de esa manera. Así, una política se ve como una restricción y no como algo que puede cambiar. Una compañía estipuló que los cambios de producto sólo se podían hacer temprano en la mañana. Cuando se le preguntó al supervisor por qué, admitió que siempre los habían hecho a esa hora. Nadie podía establecer una razón por la que no pudieran hacerse a cualquier hora del día, incluso en el segundo o tercer turno. Al eliminar esta "restricción" innecesaria el resultado fue un programa de producción mucho más flexible.

Los recursos pueden aumentarse. Si el conocimiento es una restricción, se puede eliminar contratando expertos. Es raro que las restricciones de presupuesto sean absolutas; demostrar que un pequeño incremento en el presupuesto ahorra dinero, puede hacer que el presupuesto aumente. El horizonte de tiempo del problema también afecta los cambios en recursos. Para aumentar la capacidad, trabajar horas extra es una solución a corto plazo; invertir en maquinaria es una solución a largo plazo.

5.3.4 Relaciones

Una vez definidos objetivos, restricciones y datos se determinan las **relaciones** entre ellos. Primero se define la notación; ésta debe ser precisa, sin ambigüedades. Después se usa esta notación para describir las relaciones entre las diferentes partes del problema, que están ligadas por las variables.

Las variables son las incógnitas del problema. Como ejemplos de variables se tienen el número de trabajadores a contratar el próximo mes; el número de unidades a fabricar en la planta de Salinas la próxima semana; el número de empleados que deben atender al público en el restaurante de comida rápida de las 10:00 AM a las 11:00 AM. La definición adecuada de las variables es crucial para un buen proceso de solución, y la mejor manera de hacerlo es imaginar que se dan instrucciones a alguien para que ponga en marcha la solución. Una orden como "Paul, ponga 30 Ib de nitrato, 60 Ib de ceniza y 10 Ib de amoniaco en una bolsa de 100 Ib de fertilizante" indica tres variables. Especifica cuántas libras de cada ingrediente deben ponerse en cada 100 Ib de fertilizante. Cuando se puede hacer esto se ha dado un gran paso para la especificación de las variables de solución.

5.4 Suposiciones y participación

Aunque suene como un disco rayado, de nuevo se hace hincapié en la necesidad de establecer todas las suposiciones de manera explícita. Debe involucrarse a los dueños del problema en el modelado para asegurar que el modelo sea una representación razonable del problema. Dependiendo de los resultados, puede ser necesario regresar a algún paso anterior para hacer una revisión.

5.5 Validación interna

La validación asegura que la solución será relevante para el problema real, y tiene lugar a través de todo el proceso de solución del problema. Después de construir el modelo, se verifica si hace lo que se desea; esto se llama **validación interna.**

La validación interna comienza con una evaluación cuidadosa de la lógica del modelo. Alguien familiarizado con el problema y que conozca los conceptos de modelado debe realizar este proceso, pero no debe construir de hecho el modelo. Si no es posible, intente revisarlo con alguien que conozca el problema. Al explicarle el modelo puede descubrir algunas fallas; los diagramas de flujo son una herramienta importante para la explicación de la lógica. El análisis dimensional también puede ser útil; si las partes del modelo tienen unidades de medida inconsistentes, el modelo es incorrecto. Debe revisarse la lógica de los programas de cómputo y corregirse. Los datos requeridos deben estar disponibles. Si no es así, es necesario un plan para obtenerlos o bien un cambio en el modelo.

Ejemplo 3-3. Desarrollo de un modelo para MaTell. Ahora se desarrollará un modelo para el problema de MaTell. Se desea un modelo sencillo que ayude a incrementar la producción en la planta de Vinings. Los datos disponibles son el tiempo para fabricar y ensamblar cada producto y una estimación de sus ventas máximas. Las estimaciones de tiempo se obtienen de los estándares y los datos de venta de mercadotecnia. Inicialmente se usará una representación en hoja de cálculo.

Las fronteras del modelo serán las mismas que las fronteras del sistema; se considerará sólo la planta. En esta etapa se considerará cada producto, pero sólo respecto a los departamentos de fabricación y ensamble como entidades, sin descomponerlos en el equipo específico.

Para especificar una solución del problema, se debe decir a los departamentos cuántos teléfonos de mesa, de pared y contestadoras hacer en una semana dada, lo que da una definición inicial de variables como el número de productos de cada tipo que se hacen cada semana. Sean *D*, *Wy A* el número (en miles) de teléfonos de escritorio, teléfonos de pared y contestadoras fabricados cada semana.

El objetivo debe ser medible y reflejar la meta de aumentar la producción de la planta de Vinings. Se usará como medida el número total de productos hechos en una semana. Matemáticamente se tiene

$$W + D + A$$

Existe una relación definitiva entre el número de productos y la cantidad de tiempo necesaria para los departamentos de fabricación y ensamble. Entre más productos se hacen, más tiempo se necesita. Del departamento de producción se obtiene que el tiempo de fabricación es de 2.5 horas y el de ensamble es de 3 horas para hacer 1000 teléfonos de mesa. Los tiempos para los teléfonos de pared son 4 y 3 horas/1000, y las contestadoras requieren 6 y 14 horas/1000. El tiempo total necesario para la fabricación de teléfonos de pared es 4 horas por el número de teléfonos fabricados; así, el tiempo para fabricar teléfonos es 4 x *W*. El tiempo total de fabricación para todos los productos será

$$AxW + 15xD + 6xA$$

De manera similar, el tiempo necesario en ensamble es

$$3xW + 3xD + l4xA$$

Existen restricciones en el número de productos que se pueden producir en una semana.

Mercadotecnia piensa que existe un límite en el número de productos que se pueden vender. Estos límites son 30 mil para los dos teléfonos y 12 mil para las contestadoras.

La representación del modelo será un hoja de cálculo. Aunque hay muchas formas de desarrollar una hoja de cálculo para este problema, se tendrá una columna para cada variable y cada vez que se produzca cada producto en cada departamento. Después se generará una columna para el tiempo total necesario en cada departamento. Al colocar los valores del nivel de producción de cada producto en la celda adecuada se pueden evaluar el tiempo necesario y el número producido.

Para validar internamente el modelo, se pueden verificar los datos en la hoja de cálculo, hacer un análisis dimensional e introducir algunos números para asegurar que se hacen las operaciones correctas. Los datos de tiempos de producción deben verificarse en juntas con ingeniería industrial y el personal de la planta. Los datos de demanda deben verificarse con mercadotecnia y ventas. Las unidades del valor objetivo son productos, lo que es correcto. Cada columna de tiempo está en horas (unidades x horas/unidad). Por último, se introducen números, por ejemplo $W = D = A = 1$, en la hoja de cálculo y se verifica que el número total de productos sea 3, el número de horas de fabricación sea 12.5 y de ensamble 20, que es lo que se obtiene con un cálculo manual.

Se han hecho varias suposiciones en esta etapa:

- La demanda continuará en el mismo nivel o crecerá durante algún tiempo.
- El número de productos fabricados es una buena medida para aumentar la producción.
- Las relaciones lineales entre productos y tiempos de fabricación y ensamble son válidas.
- Los datos son exactos.

Durante esta parte del proceso de solución se ha mantenido la participación de los dueños. Se han llevado a cabo varias juntas con mercadotecnia, producción y planeación, esto debe ayudar a mantener el rumbo para resolver el problema correcto.

SECCIÓN 5 EJERCICIOS

3.21. Enumere tres tipos de modelos.
3.22. ¿Por qué se necesitan datos?
3.23. ¿En dónde se obtienen los datos?
3.24. ¿Cuál es el principal peligro con los datos?
3.25. ¿Cuál es el mayor valor de un modelo?
3.26. ¿Cuáles son algunas razones para construir un modelo?
3.27. ¿Cuáles son algunos conceptos del modelado básico?
3.28. ¿Cuáles son las componentes comunes de los modelos?
3.29. ¿Qué es la validación interna?
3.30. Considere el problema del reparto de pizzas (ejercicio 3.12).

a) ¿Cuáles son los posibles modelos para este problema? *b* Desarrolle uno y valídelo internamente, c) ¿Por qué eligió este modelo?

3.31. Considere el problema de asignar asientos en un avión (ejercicio 3.13).

a) ¿Cuáles son los posibles modelos para este problema?
b) Desarrolle uno y valídelo internamente.
c) ¿Por qué eligió este modelo?

6 SOLUCIÓN DEL MODELO

Comenzando con el enunciado del problema, el analista elige un algoritmo. Esta selección depende de los recursos disponibles para resolver el problema, los algoritmos con que se cuenta y la precisión deseada en la solución. Resuelva problemas simplificados para confirmar que el modelo es apropiado. Puede ser necesario regresar a algún paso anterior en el proceso de solución de problemas si los resultados no son satisfactorios. Cuando el modelo y el algoritmo de solución son satisfactorios, se resuelve el modelo y se obtiene una solución.

6.1 Validación externa

La **validación externa** prueba la solución del modelo. Encuentra inconsistencias en él que se vieron durante la validación interna y valida el procedimiento de solución. Aquí no se transforma la solución del modelo en la solución del problema; nada más se asegura que la solución del modelo sea correcta. Para los modelos sencillos esto puede parecer una pérdida de tiempo, pero en los modelos con muchas variables, a veces es difícil saber si sus valores son correctos. La simplificación del modelo y el análisis histórico son dos estrategias básicas para la validación externa.

6.1.1 Simplificación

La **simplificación** cambia el modelo o los datos para conocer la solución. Si la simplificación tiene una solución correcta, se tendrá más confianza en la solución del problema real. Si existe una diferencia entre la solución del modelo y la solución "conocida" se puede volver a evaluar y cambiar el modelo o el enunciado del problema.

La simplificación más sencilla es buscar pequeños ejemplos del problema. Para ejemplos muy pequeños se pueden enumerar todas las posibilidades para encontrar la solución correcta. Se puede examinar el modelo completo para estos pequeños problemas y hacer cálculos a mano para verificar la lógica.

Otro enfoque es hacer suposiciones sobre los datos y la configuración del sistema que lo simplifiquen. Suponga que se está simulando un sistema de colas para el que no existe una solución analítica. Al proponer tiempos entre llegadas y de servicio exponenciales y dejar un solo servidor, se puede obtener una solución analítica. Entonces se puede hacer una corrida de simulación bajo las mismas condiciones y comparar los resultados. Si son cercanos, se tendrá más confianza en el modelo.

Se puede forzar que ciertas variables en el modelo tomen valores específicos, lo que las elimina efectivamente del modelo. Después se puede examinar la solución del modelo simplificado. También se pueden combinar variables agregándolas. Por ejemplo, suponga que se tiene un modelo de producción con muchos productos. Una simplificación sería un modelo con un solo producto que tenga las mismas características del promedio de todos los productos.

6.1.2 Análisis histórico

Una segunda estrategia para la validación externa es la perspectiva histórica. Su base es el juicio de las personas familiarizadas con el problema y su ambiente; el analista aplica el modelo a los datos históricos y los expertos examinan la solución del modelo para ver si es razonable. Se pueden resolver ejemplos de problemas con los conjuntos de datos extremos para que lo expertos reconozcan situaciones no usuales. Ackoff (1962) propuso "juntas de asesinos", comités de personas cuyo trabajo es encontrar las fallas en el modelo. Si los resultados no son aceptables se regresa a algún paso anterior.

En ocasiones no se puede modelar el problema con exactitud. Un curso de acción es usar el modelo e ignorar el hecho de que no se ajusta al problema. Otra alternativa es olvidar el modelo y optar por sólo ponerse en los zapatos. Las dos son peligrosas. Usar el modelo sabiendo que la solución tiene fallas es tal vez la mejor alternativa porque hacerlo proporcionará más información, que siempre es bienvenida. Debe recordarse, sin embargo, que el modelo no se ajusta.

No está garantizado que un modelo que "pasa" las pruebas de validación sea bueno. No existe una forma de asegurar un buen modelo; sólo se pueden eliminar los malos. La validación aumenta la confianza en el modelo y por lo tanto las posibilidades de usar los resultados para el problema real.

6.2 Solución estratégica

Aunque se estudiaron el modelado y la solución por separado, están ligados. El procedimiento de solución depende del modelo y el modelo depende de los procedimientos de solución disponibles. Es frustrante tener un gran modelo que no se puede resolver. Se hace entonces un trueque entre las bondades del modelo y la facilidad para resolverlo. Desde el punto de vista de sistemas, se sabe que es mejor una solución parcial de todo el problema que una solución completa de cada parte.

Resolver el modelo puede ser tan sencillo como introducir unos cuantos números en una ecuación o tan complicado como recolectar muchos datos, desarrollar un generador de matrices para poner los datos en el formato adecuado y resolver un problema de programación lineal. Con frecuencia, una computadora ayuda, aunque no es necesario, para resolver el problema.

Algunos modelos, por ejemplo ciertos modelos de simulación, sólo evalúan un alternativa dada. La generación de alternativas es responsabilidad del analista. Pero, ¿podemos generar una buena alternativa que evaluar? Por lo general, no se puede garantizar que una sola alternativa generada sea buena; de manera intuitiva, entre más alternativas se generen, mayor será la oportunidad de encontrar una buena. Si no es costoso evaluarlas y se generan con facilidad, entonces deben estudiarse muchas alternativas. Inversamente, si es difícil generarlas y costoso evaluarlas, no se pueden examinar muchas. Los métodos de diseño de experimentos pueden ayudar a decidir el trueque entre el gasto de la generación de alternativas y la calidad de la solución.

Otros modelos se pueden resolver mediante algoritmos que generan las alternativas y las evalúan. Los algoritmos **óptimos,** o exactos, hacen un examen implícito de todas las alternativas y eligen la mejor; un algoritmo de ruta crítica es un ejemplo. Otros, llamados algoritmos heurísticos, generan alternativas que no garantizan una solución óptima, sino una, en el mejor de los casos, que es cercana a la solución óptima. Elegir proyectos con el mayor rendimiento hasta que se agota el presupuesto es una ilustración de un algoritmo heurístico.

Aun cuando el modelo pueda tener, en teoría, una solución óptima, tal vez no sea factible en la práctica. La enumeración total resuelve problemas de programación entera, pero para problemas de una tamaño razonable, podría tomar siglos en la computadora más rápida. Para obtener soluciones en un tiempo moderado tal vez tengan que usarse algoritmos heurísticos para estos problemas.

Los algoritmos heurísticos proporcionan soluciones inciertas; como no garantizan la optimalidad, no se conoce la **calidad,** esto es, qué tan buena es la solución. Algunos algoritmos heurísticos tienen garantía de desempeño, es decir, para cualquier conjunto de datos, el algoritmo garantiza una solución con una cercanía a la solución óptima que está dentro de un porcentaje dado. También se pueden generar cotas sobre la solución óptima para un conjunto particular de datos. Estas cotas dan una idea de qué tan lejos del óptimo está la solución heurística. Si

la solución heurística tiene una ganancia de $1000 y una cota superior es $1010, la solución heurística está suficientemente cerca. Si la cota es de $2000, se tiene incertidumbre sobre la calidad de la solución heurística. La solución puede ser lejana a la óptima o puede tenerse una cota muy amplia.

Aun los algoritmos óptimos tienen incertidumbre. Una fuente de incertidumbre es qué tan bien se ajusta el modelo a la realidad; los datos son otra. Si las estimaciones no son exactas, ¿qué significa una solución óptima? La incertidumbre en los datos puede ser mayor que la incertidumbre de una solución heurística, por lo que un algoritmo heurístico puede ser tan bueno como uno óptimo.

Después de validar el modelo y determinar un algoritmo adecuado, se resuelve el modelo. El siguiente paso es interpretar la solución del modelo.

Ejemplo 3-4. Solución del modelo de MaTell. Una vez que se tiene el modelo para MaTell, es necesario resolverlo. Se validará el modelo mediante el análisis histórico. Se introducen los datos de producción actuales (D = 15, W = 17y A = 5) y se ve si los resultados están de acuerdo con lo que está sucediendo. El tiempo necesario de fabricación es 132.5 horas y para ensamble es 166 horas. Estos números son cercanos a los valores de 135 y 163, de manera que se acepta el modelo. Por supuesto los modelos más complicados requieren una mayor validación.

Debido a que este modelo de hoja de cálculo sólo evalúa las soluciones, es preciso generar varias alternativas. Se puede usar un enfoque de prueba y error, pero se utilizará un algoritmo de búsqueda con malla. Se deja que la producción de teléfonos de mesa varíe de 5 a 30 de 5 en 5. Se hace lo mismo para los teléfonos de pared y para las contestadoras dejando que varíen de 4 a 12 de 4 en 4. Esto crea 74 combinaciones de los niveles de los tres productos.

Se crea un renglón en la hoja de cálculo para cada combinación de los tres productos y se evalúa cada una. Se modifica el número de productos fabricados de manera que sus valores sean cero si el plan necesita más tiempo de fabricación o ensamble que el disponible. Se ordenan los renglones poniendo primero el que tiene el número máximo producido. Los primeros 15 renglones de la hoja se muestran en la tabla 3-1. Varias soluciones de este modelo fabrican 39 000 unidades. Se estudiará con más detalle la solución cuando se traduzca a la solución del problema.

TABLA 3-1
Hoja de cálculo para elegir la mezcla de productos

Teléfonos de pared (unidades)	Teléfonos de mesa (unidades)	Contestadoras (unidades)	Tiempo de fabricación (horas)	Tiempo de ensamble (horas)	Unidades fabricadas (unidades)
25	10	4	149	161	39
20	15	4	142	161	39
15	20	4	134	161	39
10	25	4	126	161	39
20	10	4	129	146	34
15	15	4	122	146	34
10	20	4	114	146	34
15	10	4	109	131	29
10	15	4	102	116	24
25	25	12	234	318	0
25	30	12	247	333	0
10	10	8	113	172	0
20	30	8	203	262	0
15	25	4	146	176	0
10	10	12	137	228	0

SECCIÓN 6 EJERCICIOS

3.32. ¿Qué es la validación externa? ¿En qué difiere de la validación de la comprensión del problema y de la validación interna?
3.33. ¿Cuáles son las dos técnicas que se pueden usar en la validación externa?
3.34. ¿Qué es un algoritmo óptimo? ¿Qué es un algoritmo heurístico?
3.35. ¿Por qué se usan los algoritmos heurísticos?
3.36. Considere el problema de reparto de pizzas (ejercicio 3.12).

a) Resuelva su modelo y haga una validación externa.
b) ¿Es suficiente para resolver el problema?
c) ¿Cuáles son sus fortalezas y debilidades?

3.37. Considere el problema de asignación de asientos en un avión (ejercicio 3.13).

a) Resuelva su modelo y haga una validación externa.
b) ¿Es suficiente para resolver el problema?
c) ¿Cuáles son las fortalezas y debilidades?

7 INTERPRETACIÓN DE LA SOLUCIÓN

¡Las soluciones de un modelo no necesariamente son soluciones del problema! Si el modelo es una buena representación del problema, puede llevar a una solución de éste. Debido a que es difícil incorporar todas las interacciones en un modelo y resolverlo, debe tenerse cuidado al aplicar la solución del modelo al problema real. Juntos, el analista y los dueños del problema deben traducir la solución del modelo en una solución útil para el problema. Aquí se estudiará la estabilidad de la solución respecto a las inexactitudes e incertidumbres de los datos. Además se deben determinar los efectos que las suposiciones hechas tienen sobre la solución. Tanto el juicio del analista como el de los dueños juegan un papel importante. De nuevo, puede ser necesario regresar a algún paso anterior para cambiar o definir el proceso; si no es así, se tiene una solución del problema.

Se verifica que la solución sea razonable. Se proporciona la solución a las personas que la usarán y se recaban sus comentarios. Si piensan que es razonable y la usarían, se puede tener más confianza en el modelo y la solución. Si creen que la solución no es adecuada, la solución no necesariamente está equivocada, pero su opinión indica que la tarea no ha terminado. El analista debe determinar si existe un problema con el modelo o explicar a los dueños por qué la solución es correcta.

Como los datos utilizados en el modelo pueden no ser exactos, cabe la duda de si la solución cambiaría al cambiar los datos. Idealmente, sin embargo, la solución no cambia de manera significativa con pequeños cambios en los datos; una solución de este tipo es **robusta.** Si se resuelve el modelo con programación lineal, se puede usar análisis de sensibilidad para contestar esta pregunta. Otros modelos tienen formas similares para determinar la sensibilidad de la solución respecto a los datos. Si tales métodos no existen, se puede resolver el modelo muchas veces con conjuntos de datos un poco distintos y examinar las soluciones. Si los resultados de este paso no son satisfactorios, es necesario modificar el modelo y repetir el proceso de solución del problema.

También debe examinarse si las suposiciones son robustas. Imagine que se supuso una relación lineal para los costos pero no se tenía seguridad sobre ella. Se puede resolver el modelo

sustituyendo la ecuación lineal de costos por una con costos no lineales. Si las soluciones de los dos modelos son similares la suposición de linealidad es robusta. Por el contrario, si las soluciones son muy diferentes, la suposición es inválida. Debe determinarse la verdadera naturaleza de la relación de costo para que el modelo represente correctamente el sistema.

Tenga cuidado con los números producidos por las computadoras. Cuando una computadora da 75.37542 algunas personas suponen que el número es exacto. Si los datos de entrada no se conocen con cinco decimales, la salida no puede ser tan exacta. Además, a menos que hayan escrito el programa, no pueden saber qué suposiciones hizo el programador. Aun el programador puede hacer algunas suposiciones sin estar totalmente consciente de ellas.

Algunas veces, no importa cuánto esfuerzo se haya hecho, no se pueden lograr resultados aceptables. Algunos problemas pueden no aceptar el enfoque del modelado. En este caso el analista puede no tener otra alternativa que rendirse y usar el enfoque de ponerse en los zapatos. Un problema común de los analistas es no reconocer que tienen que ceder.

Suponiendo que se puede obtener una solución del problema a partir de la solución del modelo, llega el momento de la implantación.

Ejemplo 3-5. Solución del problema de MaTelI. La solución del modelo es el principio de la solución del problema. La discusión con los dueños es crítica en esta etapa. Existen varias soluciones del modelo que permiten a MaTell hacer 39 mil productos. El personal de producción piensa que pueden llevar a cabo cualquiera de los planes para obtener la producción deseada. Esta solución valida la suposición de que se pueden hacer más productos con una mejor planeación.

El personal de mercadotecnia está preocupado porque los 2000 productos adicionales todavía dejarán algunos clientes sin poder comprar los productos que quieren. Como se aumentó la producción, tal vez se desee ver si puede mejorar aún más. Como se usó una malla gruesa en la hoja de cálculo, puede haber otras combinaciones mejores. Entonces, se cambiará la representación. Un modelo lineal sería similar a la hoja de cálculo pero evaluaría todos los planes posibles y seleccionaría el mejor.

Mercadotecnia tiene otra objeción: la nueva mezcla de productos puede no ser tan rentable como la antigua. No se ha considerado la ganancia del plan como debía haberse hecho. Aunque maximizar la ganancia puede no ser la necesidad crítica en esta situación, no debe usarse un plan que no proporcione una ganancia aceptable. Mercadotecnia dice que los márgenes de los tres productos son \$2.20, \$2.00 y \$7.00 para los teléfonos de mesa, los de pared y la contestadora, respectivamente. Algunos cálculos rápidos muestran que producir (25,10,4) unidades da \$103 000, que es un poco mejor que la cantidad actual de \$ 102 000. Los otros planes que producen 39 000 unidades no mejoran la ganancia del plan actual.

En este punto, se regresa a la etapa de modelado y se desarrolla un modelo más refinado, a saber, un programa lineal. Como se parece mucho al de la hoja de cálculo, simplemente se establecerá. Sin embargo, debe resolverse el conflicto sobre el objetivo. Como debe considerarse la ganancia, debe volverse a pensar en el enunciado de la misión original. Por brevedad no se verá con detalle, se deja a la imaginación del estudiante. Como programación lineal (PL) es sencilla, se resolverá dos veces, una maximizando el número de productos fabricados y otra maximizando la ganancia. El modelo de PL para la ganancia es el siguiente:

$$\text{Maximizar} \quad 2.2D + 2W + 7A$$

sujeta a

$$\begin{aligned} 4D + 2.5W + 6A &\le 168 \\ 3D + 3W + 14A &\le 168 \\ D &\le 30 \\ W &\le 30 \\ A &\le 12 \end{aligned}$$

Al resolver este modelo de PL con un paquete estándar como STORM o LINDO se obtiene la solución (21.94,30,0.864) con una ganancia total de $114 362. En cuanto se ve que se hacen tan pocas contestadoras, se sabe que hay un problema. Producir tan pocas puede causar problemas, aunque este número sea el de mayor ganancia según el modelo. El modelo no considera que algunas personas comprarán teléfonos y contestadoras al mismo tiempo o querrán tener la misma marca. Así, se cambia el modelo agregando cotas inferiores de 10,10 y 4 para los productos. La nueva solución de PL es (27.3,10,4) con una ganancia de $108 133. Al calcular el número de productos fabricados se obtiene 41 333, que es una mejor solución que cualquiera de las consideradas hasta ahora. Si se cambia el objetivo $aD + W + Ayse$ resuelve el problema, se obtiene (10,27.3,4) con una ganancia de $104 600 y un total de 41 333 unidades producidas. Como esta solución produce el mismo número de unidades que el plan con la ganancia máxima, éste es superior. Se debe seguir con este análisis y observar varias combinaciones del plan hasta que los dueños estén satisfechos.

El uso de PL permite una investigación rápida de la estabilidad del modelo. Es sencillo evaluar cambios en los datos con las técnicas de sensibilidad estándar de PL. Para el modelo con cotas inferiores, el objetivo es la ganancia en dólares y la restricción de ensamble está en horas, de manera que sólo se podrían obtener $0.73 (como lo indican los precios sombra) agregando una hora de tiempo de ensamble. En el sentido económico, agregar más tiempo prohibe agregar más trabajadores o máquinas, ya que su costo excedería el incremento en la ganancia. Este escenario valida la misión de una mejor planeación, puesto que el incremento en la capacidad sería muy costoso.

También se pueden evaluar otras partes del problema. El análisis de sensibilidad sobre el tiempo de ensamble necesario para hacer un teléfono de mesa podría mostrar que se necesita más exactitud en los datos, lo que puede requerir un estudio de tiempos u otras maneras de estimar los parámetros del problema.

Una vez que los dueños del problema estén satisfechos con la solución, puede llevarse a cabo la implantación.

SECCIÓN 7 EJERCICIOS

3.38. ¿Por qué no se ha terminado el trabajo cuando se tiene la solución del modelo?

3.39. ¿Qué es una solución robusta?

3.40. ¿Qué pasos se toman para interpretar una solución?

3.41. Considere el problema del reparto de pizzas (ejercicio 3.12).

a) ¿Cómo se siente respecto a su solución?
b) ¿Qué información adicional adquirió?
c) Si tuviera más tiempo y recursos, ¿qué haría diferente?

3.42. Considere el problema de asignación de asientos en un avión (ejercicio 3.13).

a) ¿Cómo se siente respecto a su solución?
b) ¿Qué información adicional adquirió?
c) Si tuviera más tiempo y recursos, ¿qué haría diferente?

8 IMPLANTACIÓN

Cuando se encuentra una solución del problema comienza la implantación. Todos los interesados deben aceptar la solución. Deben asignarse los recursos necesarios y hay que capacitar a las personas adecuadas para llevar a cabo la nueva solución. La producción paralela del nuevo mé-

todo y el actual es una buena práctica. Por último, se debe supervisar el progreso de la nueva solución para asegurarse de que nada salga mal.

Recuerde que los problemas no existen en el vacío. Para implantar una solución, por lo general es necesario cambiar algunos sistemas. Es difícil vencer la inercia de un sistema bien establecido. Para ser un analista exitoso debe instituirse el cambio en el sistema.

Es notoria la resistencia de las personas al cambio. Éste se acepta sólo cuando su necesidad es clara y pueden ayudar a planearlo. Los dueños insatisfechos no aceptarán la solución, por lo tanto, deben participar continuamente en el proceso de solución del problema para que sea más probable que comprendan y acepten los resultados finales.

Presente sus resultados con el entusiasmo de un vendedor, utilice un lenguaje sencillo y establezca claramente la importancia del problema; use hechos para respaldar su posición. Presente tanto los aspectos positivos como los negativos de su solución, haga hincapié en los puntos clave e intente anticipar las preguntas. Si es posible, dé varias soluciones alternativas que cubran beneficios y costos; incluya, además, la alternativa de "no hacer nada".

La implantación exitosa requiere un gran compromiso. Las personas que controlan los recursos necesarios para la implantación deben participar. Quienes utilizan la solución son los que la harán funcionar. Aun cuando se tiene una gran solución, ésta fracasará si no está apoyada por los usuarios.

Una vez que la implantación está en marcha, asegúrese de que es fácil usar la solución. Es necesario que el software sea amigable y que se hagan los informes adecuados. Las personas aceptan los informes con más facilidad si su forma es familiar; examine los informes actuales e intente hacer los nuevos tan parecidos como sea posible, suponiendo que los dueños estuvieron contentos con los informes existentes y que fueron efectivos.

La mayor parte de los sistemas no operan por sí mismos, por lo que la gente que lleva a cabo la solución debe estar bien capacitada. Por lo general, el tiempo y el dinero para la capacitación son una buena inversión. Los usuarios mal entrenados pueden causar que el mejor sistema dé resultados pobres. Asegúrese de que la capacitación sea oportuna, ni muy pronto ni muy tarde.

Recuerde la ley de Murphy: "si algo puede salir mal, saldrá mal". Antes de la implantación final, intente preveer y preguntar a otros lo que puede salir mal; suponga lo peor y examine las consecuencias; desarrolle planes de contingencias que deberán usarse si las cosas salen mal. Si está preparado para la mala fortuna y todo sale bien, perdió tiempo; pero si no se prepara, puede ser que tenga que buscar un nuevo empleo.

Al poner en marcha un sistema nuevo, no deje de usar el actual de inmediato. En su lugar, opere ambos sistemas en paralelo durante algún tiempo. Invariablemente surgen problemas no previstos y si ya no se tiene el sistema actual, puede ocurrir un caos. Al mantenerlo se pueden resolver este tipo de situaciones. Aun cuando el nuevo sistema funcione bien, el actual sirve de comparación y los beneficios se podrán cuantificar con mayor facilidad.

Un sistema de control debe ser parte de la implantación. Supervisa el sistema y proporciona retroalimentación sobre su desempeño. El sistema de control debe también indicar el desempeño no esperado. Esta retroalimentación debe usarse para cambiar o ajustar la solución.

En ocasiones, la solución de problemas no tiene éxito y la causa más común del fracaso es que los dueños no participaron en el proceso. Como lo expresa Gene Woolsey (Woolsey y Swanson, 1975), "los administradores prefieren vivir con un problema que no pueden resolver que aceptar una solución que no pueden entender". Entonces, la alta administración debe estar comprometida con el proyecto.

Otra causa de fracaso es que se obtuvo la mejor solución para parte del sistema y no para todo el sistema, esto se conoce como **suboptimización.** Si esto ocurre, lo más probable es que ni las fronteras del problema ni su misión se definieron correctamente. Si un empleado quiere terminar varios trabajos, las tareas más cortas deben hacerse primero. Sin embargo, si las tareas más largas se atrasan y causan que los clientes cancelen sus órdenes, lo que era bueno para el empleado no es bueno para la compañía.

Por último, las personas pueden ser la cuasa del fracaso. La incompetencia, la inexperiencia y el exceso de confianza del analista y una capacitación inadecuada de los usuarios pueden provocar el fracaso. Si la gente se siente amenazada por el proceso o bien por la solución, el fracaso es probable.

Ejemplo 3-6. Implantación en **MaTell.** Al implantar una solución para el problema de planeación, primero se necesita presentar la solución. Aunque el modelo de la hoja de cálculo no se usó para obtener la solución, sería una buena forma de presentar la solución de PL. Muchas personas usan hojas de cálculo en su trabajo, por lo que están familiarizadas con ellas y es sólo un pequeño paso introducir la idea de la elección automática de los niveles adecuados de producción.

Como los dueños del problema participaron en el proceso de solución, la aceptación debe ser relativamente sencilla. El compromiso puede ser más difícil; pero los únicos recursos necesarios son el paquete de PL y la capacitación de quienes hacen la planeación.

Será importante convencerlos de que "automatizar" parte de la decisión de planeación será una acción positiva. Esta idea se puede vender como un incremento en las habilidades que ayudará en la carrera de quienes hacen planeación.

Al recordar la ley de Murphy, debe intentarse predecir lo peor que puede pasar al implantar la solución y asegurarse de que no será la causa del fracaso.

Al principio, haga que los analistas sigan desarrollando un plan en forma independiente de la solución de PL. Después, desarrolle el plan real como una combinación de los dos planes. Si hay problemas con la solución de PL se dispone de un plan. Conforme quienes hacen la planeación adquieren confianza en el sistema de PL elimine el plan actual. Asegúrese de que los informes no son demasiado distintos de los anteriores para que los acepten mejor.

Por último, verifique el sistema de vez en cuando. Cerciórese de que si las condiciones cambian, el sistema no se quede obsoleto. Las soluciones que eran buenas bajo un conjunto de condiciones pueden ser muy malas cuando la situación cambia.

Lo más impotante es recordar que muy pocas veces existe una sola solución para cualquier problema, aun cuando la solución del modelo produzca sólo una. El propósito real de construir y resolver un modelo es producir una mejor visión del problema. En última instancia, una persona toma la decisión; los administradores que dejan que el modelo decida están delegando su responsabilidad.

SECCIÓN 8 EJERCICIOS

3.43. ¿Por qué deben presentarse soluciones alternativas para el problema?
3.44. ¿Qué es lo más difícil al implantar una solución?
3.45. ¿Qué es un sistema de control y por qué es necesario?
3.46. Describa un plan de implantación para el problema de reparto de pizzas (ejercicio 3.12).
3.47. Describa un plan de implantación para el problema de asignación de asientos (ejercicio 3.13).

9 SOFTWARE

Muchos paquetes para computadora ayudan a la solución de problemas y muchos problemas no se pueden resolver sin una computadora. Las hojas de cálculo (Excel, Lotus, Quattro) son sencillas y muy útiles en este proceso. Para problemas más matemáticos son útiles los paquetes de cálculos algebraicos (Mathcad, Matlab, Mathematica) algunas veces llamados pizarrones electrónicos. Los paquetes de análisis estadístico (SAS, Minitab, SPSS) pueden extraer información de los datos. Los programas de optimización (LINDO, CPLEX, OSL) están disponibles y proporcionan soluciones óptimas para muchos modelos. Los lenguajes de modelado (AMPL, GAMS) facilitan la creación de modelos de optimización, pero a costa de aprenderlos. Los lenguajes de simulación (GPSS, SIMAN) y otros paquetes (Promodel, Witness) pueden proporcionar una mejor visión de muchos problemas.

Existen también muchos paquetes hechos a la medida para los cursos de planeación y control de la producción. STORM (Emmons *et al*, 1989) fue uno de los primeros y todavía es un paquete amigable y comprensible. QS (Chang, 1995) es similar y Savage (1993) proporciona agregados a Lotus para resolver problemas de planeación y control de la producción.

El software mencionado es común; pero de ninguna manera se trata de una lista exhaustiva. Cuando se analicen problemas específicos se hablará del software específico.

10 EVOLUCIÓN

La solución de problemas se ha estudiado durante muchos años. Los matemáticos han estudiado el tema de manera formal durante casi un siglo. El método científico y la administración científica son precursores de las ideas que se han presentado. Los primeros trabajos sobre solución de problemas en planeación y control de la producción son, lo más probable, los libros de Polya (1957) y Ackoff (1962) y el artículo de Morris (1967). Estas fuentes hicieron el tema más accesible a la comunidad de producción.

Para la perspectiva contemporánea de la solución de problemas, se puede encontrar en los libros de Ackoff (1991), Arnold (1992) y Keon (1985). Los métodos específicos útiles en la solución de problemas se encuentran en Griver (1988), Murthy *et al.* (1990), Rubinstein (1986), Starfield *et al.* (1990), Van Gundy (1981) y Wilson (1984). Brown y Walter (1983) abundan en el tema de identificación del problema y Edén *et al.* (1983) investigan el papel del sesgo en la solución de problemas. También el artículo de Kimbrough *et al.* (1993) tiene varios ejemplos buenos de validación y sensibilidad.

La creatividad juega un papel importane en la solución de problemas. Algunos libros buenos que resaltan la creatividad son los de Adams (1986), Evans (1991), Flood y Jackson (1991), Lumsdaine y Lumsdaine (1995) y Nadler e Hibino (1990). Entre los libros con una orientación más práctica de la solución de problemas en situaciones de negocios están los de Lyles (1982), Plunkett y Hale (1982) y Woolsey y Swanson (1975). Aunque estos libros son más viejos y puede ser que no reflejen con exactitud el mundo empresarial actual, contienen mucha información útil, en particular este último.

Para terminar, puede ser interesante ver la perspectiva de un estudiante sobre la solución de problemas. El artículo de Pinker *et al.* (1993) presenta un proyecto estudiantil realizado en el "mundo real". Refuerza muchos de los puntos de este capítulo por lo que se recomienda su lectura.

11 RESUMEN

En este capítulo se describió un enfoque para la solución de problemas. Los pasos más importantes son la identificación y comprensión del problema. Una vez efectuados estos pasos, casi siempre se construye un modelo. La descripción de fronteras, objetivos, relaciones y variables es parte de la construcción del modelo. Se identifican los datos necesarios y se elige una representación. El modelo se resuelve con un algoritmo adecuado y se interpreta la solución considerando la situación real. Por último, se implanta una solución para el problema real.

Para tener éxito, los dueños del problema deben participar a través del proceso. Si no es así, la posibilidad de fracasar será alta. Además, es en extremo importante reconocer todas las suposiciones. La mejor manera de hacerlo es escribirlas explícitamente para que todos las conozcan.

En este libro se presentan varios modelos para la planeación y el control de la producción. Nuestra experiencia muestra que rara vez se pueden reunir datos e introducirlos en uno de estos modelos para obtener una solución a un problema real, porque las suposiciones que fundamentan el modelo pueden no ser correctas para la situación. Cada problema se debe atacar en forma independiente.

¿Significa esto que los modelos presentados son inútiles? ¡Por supuesto que no! Cuando se resuelven problemas reales, se comienza con un modelo "estándar" y se cambia hasta que se ajuste al problema que se tiene. Esto quiere decir que no sólo debe saberse cómo usar los modelos propuestos sino entender sus suposiciones y cómo se desarrollaron. Hacerlo permite construir nuevos modelos y resolverlos conforme se requiera.

MINICASO: ASUNTOS DE PESO

"Éste es el tercer pedido de 2PR que no he podido aceptar esta semana", dijo Doug. "Podríamos ganar mucho más dinero si pudiéramos venderle a los clientes potenciales."

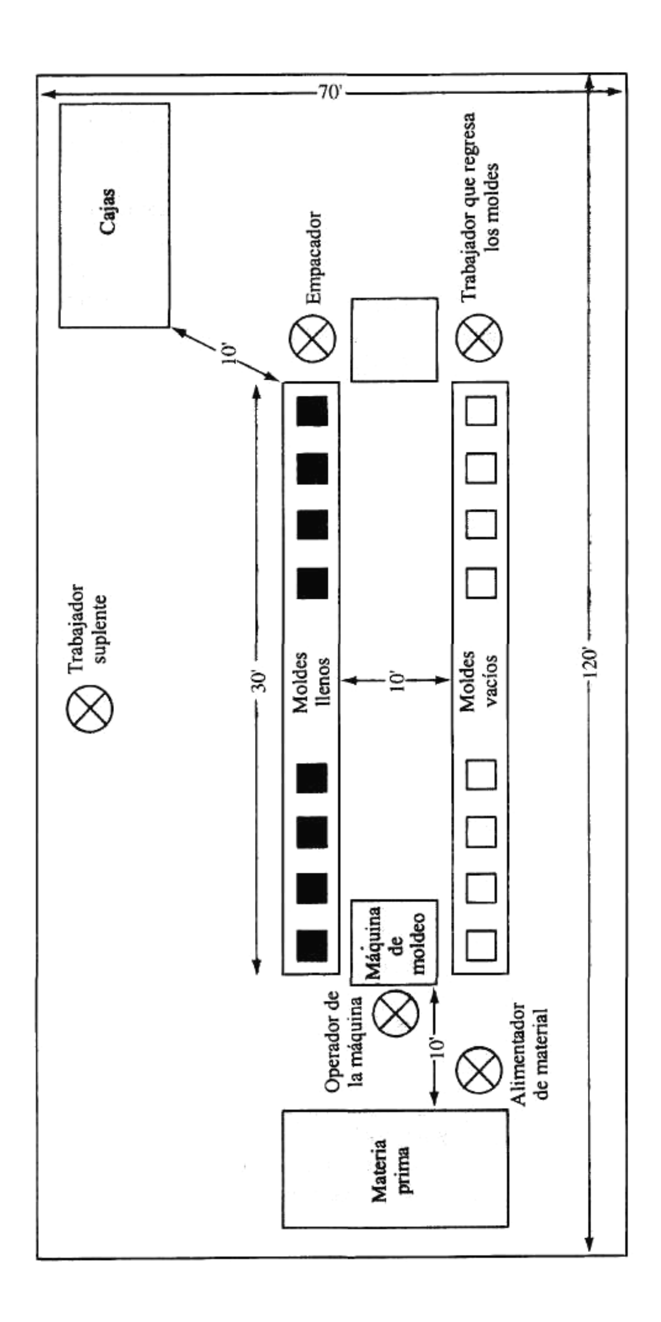
"Puede empeorar", contestó Loretta. "Algunos de nuestros clientes pueden encontrar otros proveedores si no podemos satisfacer su demanda. Tal vez necesitemos construir una nueva planta."

Si alguna vez se observa de cerca una lámpara de mesa se ve que contiene un peso en la base para que no se caiga. Otros poductos también usan pesas, incluso los tractores. Varios proveedores, entre ellos la Heavyweight, Inc., hacen estas pesas. La de mejor venta es una pesa circular de 2 libras, la 2PR.

Heavyweight tiene la patente de un polvo especial *llamado procreto,* que se usa para hacer las pesas. Producen procreto en una planta pequeña adyacente a la planta de moldeo. El procreto se empaca en bolsas de 100 Ib y parte se vende a otros productores de pesas, pero la mayor parte se manda a su propia planta de moldeo.

En la planta, se pone el procreto en una máquina de moldeo, donde se calienta a presión. Este proceso da consistencia de lodo al procreto, y la máquina automáticamente saca una cantidad predeterminada a un molde, en forma de chorro. Una línea está dedicada a la 2PR, con cinco pesas de 2 Ib en cada molde. Cuando el procreto se endurece, se quita del molde, se empaca en cajas de cartón y se manda al cliente.

En seguida se presenta un diagrama de la línea de producción 2PR. Se tienen 6 empleados. Uno maneja la máquina; aunque casi toda la operación es automática, debe tener un operador


70'
Cajas
10'
Empacador
Trabajador que regresa
los moldes
Trabajador
suplente
30'
Moldes
llenos
10'
Moldes
vacíos
120'
Máquina
de
moldeo
Operador de
la máquina
10'
Alimentador
de material
Materia
prima

cuando está trabajando. Otro trabajador alimenta la máquina con procreto. El tonel de la máquina tiene una capacidad de 100 Ib y no puede operar en seco. Un trabajador saca el molde de la banda, quita las pesas del molde y las empaca en cajas. Este proceso toma alrededor de un minuto por molde. Otro trabajador limpia el molde, lo cubre con una capa de teflón y lo vuelve a poner en la banda para que regrese a la máquina. Estas tareas toman alrededor de 20 segundos por molde. El quinto empleado barre, limpia lo que se riega, etcétera. El sexto es un trabajador suplente que puede relevar a otros trabajadores que están en su tiempo personal, de descanso, o de comida. La planta opera un turno de 8 horas.

Loretta, la gerente de la planta, piensa que podrían vender cerca de 9000 pesas diarias si pudieran producirlas. La máquina de moldeo produce actualmente 60 moldes por hora; aunque tiene capacidad para producir 200 moldes por hora. Sin embargo, si se aumenta la velocidad de la máquina las pesas no estarán secas cuando tengan que retirarse de los moldes. Doug, el director de ventas, sabe que si los moldes se pudieran endurecer más rápido se podrían hacer más productos. ¿Qué recomendaciones le daría a Loretta?

12 REFERENCIAS

Ackoff, R. L., *Scientific Method,* John Wiley & Sons, Nueva York, 1962.

Ackoff, R. L., *Ackoff's Fables,* John Wiley & Sons, Nueva York, 1991.

Adams, J. L., *Conceptual Blockbusting,* Addison-Wesley Publishing Company, Reading MA, 1986.

Arnold, J. D., *The Complete Problem Solver,* John Wiley & Sons, Nueva York, 1992.

Brown, S. I. y Walter, M. I., *The Art of Problem Posing,* Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ, 1983.

Chang, Y. L., *QS: Quantitative Systems,* Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995. Edén, C, Jones, S. y Sims, D., *Messing About in Problems,* Pergamon Press, Oxford, UK, 1983. Emmons, H. Flowers, A. D., Khot, C. M. y Mathur, K., *STORM: Quantitative Modelingfor Decisión Support,* Holden-Day, Inc., Oakland CA, 1989. Evans, J. R., *Creative Thinking in the Decisión and Management Sciences,* South-Western Publishing Company, Cincinnati, OH, 1991.

Flood R. L. y Jackson, M. C, *Creative Problem Solving,* John Wiley & Sons, Chichester, UK, 1991.

Griver, J. S., *AppliedProblem Analy'sisPlus,* Compsych Systems, Inc., Publications División, Marina del Rey, CA, 1988. Kimborugh, S. O., Oliver, J. R. y Pritchett, C. W., "On Post-Evaluation Analysis: Candle-Lighting and Surrogate Models", *Interfaces,* 23, 17-28, 1993.

Koen, B. V., *Definition of the EngineeringMethod,* American Society for Engineering Education, Washington, DC, Nueva York, 1985. Lumsdaine, E. y Lumsdaine, M., *Creative Problem Solving,* McGraw-Hill Publishing Company, Nueva York, 1995. Lyles, R. I., *Practical Management Problem Solving and Decisión Making,* Van Nostrand Reinhold Company, Nueva York, 1982.

Morris, W. T., "On the Art of Modeling", *Management Science,* 13, B707-B717, 1967. Murthy, D. N. P., Page, N. W. y Rodin, E. Y., *Mathematical Modeling,* Pergamon Press, Elmsford, NY, 1990.

Nadler, G. e Hibino, S., *Breakthrough Thinking,* Prima Publishing, Rocklin, CA, 1990. Ohno, T., *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production,* Productivity Press, Cambridge, MA, 1988. Pinker, E. J., Shumsky, R. A., Malone, K. M. y Sungsu, A., "ORTheory and Practice: A Student Perspective", *OR/MS Today,* 20, 3, 56-58,1993.

Plunkett, L. C. y Hale, G. A., *The Proactive Manager*, John Wiley & Sons, Nueva York, 1982.
Polya, G., *How ío Solve It,* Doubleday & Company, Garden City, NJ, 1957.
Rubinstein, M. F., *Tools for Thinking and Problem Solving,* Prentice-Hall, Incorporated, Englewood
Cliffs,NJ, 1986. Savage, S. L., *Fundamental Analytic Spreadsheet Tools for Quantitative Management,* McGraw-Hill
Publishing Company, Nueva York, 1993. Starfíeld, A. M., Smith, K. A. y Bleloch, A. L., *How to Model It: Problem Solving for the Computer Age,*
McGraw-Hill Publishing Company, Nueva York, 1990. VanGundy, A. B., *Techniques ofStructuredProblem Solving,* Van Nostrand Reinhold Company, Nueva
York, 1981.
Wilson, B., *Systems: Concepts, Methodologies and Applications,* John Wiley & Sons, Nueva York, 1984.
Woolsey, R. E. D. y Swanson, H. S., *Operations Research for Intermedíate Application: A Quick & Dirty Manual,* Harper & Row, Nueva York, 1975.

CAPITULO

4

Pronósticos

1 INTRODUCCIÓN

"¿Veinte mil llantas? Nunca se venderán tantas en junio. ¡ Los de mercadotecnica están locos!", exclamó Carol. Es obvio que ella no estaba de acuerdo con la predicción de mercadotecnia sobre las ventas de junio. ¿Cómo podría determinarse una mejor estimación?

Existen varias maneras de obtener una respuesta a esta pregunta. Una es sencillamente adivinar. Se podría preguntar a Pete, el supervisor del área de moldeo. Ha estado ahí durante 25 años, y su experiencia debe darle una buena idea de cuántas llantas se venderán. Pete señala que se espera que las ventas de automóviles subirán en agosto, de manera que quizá el número no esté tan alejado después de todo. Un buen analista de problemas puede examinar la demanda de los meses anteriores e intentar estimar la demanda para junio.

Por supuesto, ninguno de estos métodos garantiza que los resultados sean buenos. La adivinanza puede resultar muy lejana a la realidad; incluso la experiencia de Pete puede no ser suficiente para llegar a una buena predicción. Las ventas de automóviles puede afectar las de llantas —hasta los automóviles nuevos necesitan llantas— pero tal vez no en forma directa. Los modelos matemáticos complejos pueden no dar predicciones precisas; si usted piensa lo contrario, considere la predicción del clima.

Determinar qué pasará en el futuro con el fin de tomar decisiones adecuadas es un problema que se presenta con frecuencia. Este hecho es cierto no sólo en la vida personal, sino también en el mundo de los negocios. Se usa el término **pronosticar** para hacer referencia a un método específico, en lugar de la simple adivinanza, para predecir eventos futuros.

En los sistemas de producción controlados por el mercado de la actualidad, los pronósticos son más importantes que nunca. Tanto la recompensa por un buen pronóstico como la penalización por uno malo pueden ser bastante altas. Con la proliferación de los paquetes para computadoras personales, los pronósticos son más sencillos y menos costosos que antes. Sin embargo, los administradores deben tener cuidado de usar los paquetes sin entender los principios en que se fundamentan. Después de todo, el programa dará una respuesta, aun cuando sea mala. En este capítulo se presenta una variedad de técnicas de pronósticos, una idea de las situaciones en las que se aplican y sus principios fundamentales. También se ve cómo evaluar los pronósticos y la manera de ajustar tanto el pronóstico como las técnicas que se usan.

Se analizarán tres clases de métodos de pronósticos. La primera está constituida por métodos subjetivos o cualitativos. En su forma más simple, utilizan la opinión de un "experto" para obtener el pronóstico. Preguntar a Pete fue un ejemplo sencillo de este enfoque. La segunda clase, los métodos causales, intenta relacionar la variable que se quiere pronosticar con alguna otra variable. Un ejemplo es relacionar la producción de automóviles con la venta de llantas.

Los métodos de series de tiempo usan el pasado para tratar de determinar el futuro y están basados en principios estadísticos. El estudio de las ventas anteriores de llantas para obtener un pronóstico de las ventas futuras puede realizarse usando el enfoque de series de tiempo. Por último, se presenta un panorama general de los sistemas, el control, los métodos y la práctica para pronosticar. Primero se analizará el pronóstico desde la perspectiva de sistemas.

2 EL SISTEMA DE PRONÓSTICOS

Como se observó en el capítulo 3, la solución de problemas incluye una serie de pasos. Cuando ocurre un problema "estándar", con frecuencia se puede simplificar el procedimiento. Los pronósticos incluyen muchos modelos estándar. En esta sección se estudiarán las etapas de la solución de problemas relacionadas con los pronósticos. En el resto del capítulo se profundizará sobre las metodologías particulares de pronósticos.

2.1 Identificación del problema

Los pronósticos proporcionan información para tomar mejores decisiones. El primer paso es identificar la decisión. Si la decisión no se afecta por el pronóstico, el pronóstico es innecesario. La importancia de la decisión sugerirá el esfuerzo que debe dedicarse a producir un pronóstico. Una decisión de una sola vez requiere un pronóstico, mientras que una decisión recurrente necesita un pronóstico cada vez que se toma la decisión. En cualquier caso, la decisión determina qué pronosticar, el nivel de detalle necesario y con qué frecuencia se hará el pronóstico. Los pronósticos de ventas, calidad de materiales, ingresos, gastos, uso de energía o los tiempos de llegada de los clientes son una necesidad común en las empresas.

Suponga que la decisión es cuántos televisores producir el siguiente año. Esta decisión es importante porque afecta directamente el empleo, los niveles de materia prima, la mercadotecnia (publicidad), la distribución y el almacenamiento. La demanda de un producto es en sí misma un pronóstico; en esta etapa, puede que las variaciones particulares del producto no sean importantes. Debido a que muchas plantas operan con planes mensuales o de cuatro semanas, debe pronosticarse la demanda mensual. Si se hace alguna planeación por trimestres, los pronósticos mensuales se pueden combinar. Por otro lado, un pronóstico a un plazo más corto puede requerir variaciones individuales del producto, por ejemplo de los televisores de 13", 19" y 25".

Quien toma decisiones es el dueño del problema. El analista es quien pronostica. La mayor parte de los pronósticos son preparados por equipos que incluyen la administración, la mercadotecnia, el analista y tal vez el procesamiento de datos. La identificación del problema determina la misión o el propósito, que se muestra como necesidad del pronóstico en la figura 4-1 e inicia el diseño del sistema de pronósticos.

2.2 Comprensión del problema

La clave para entender los problemas de pronósticos es comprender el **proceso;** por ejemplo, el proceso que crea la demanda de un artículo. Nunca se puede comprender por completo el pro-

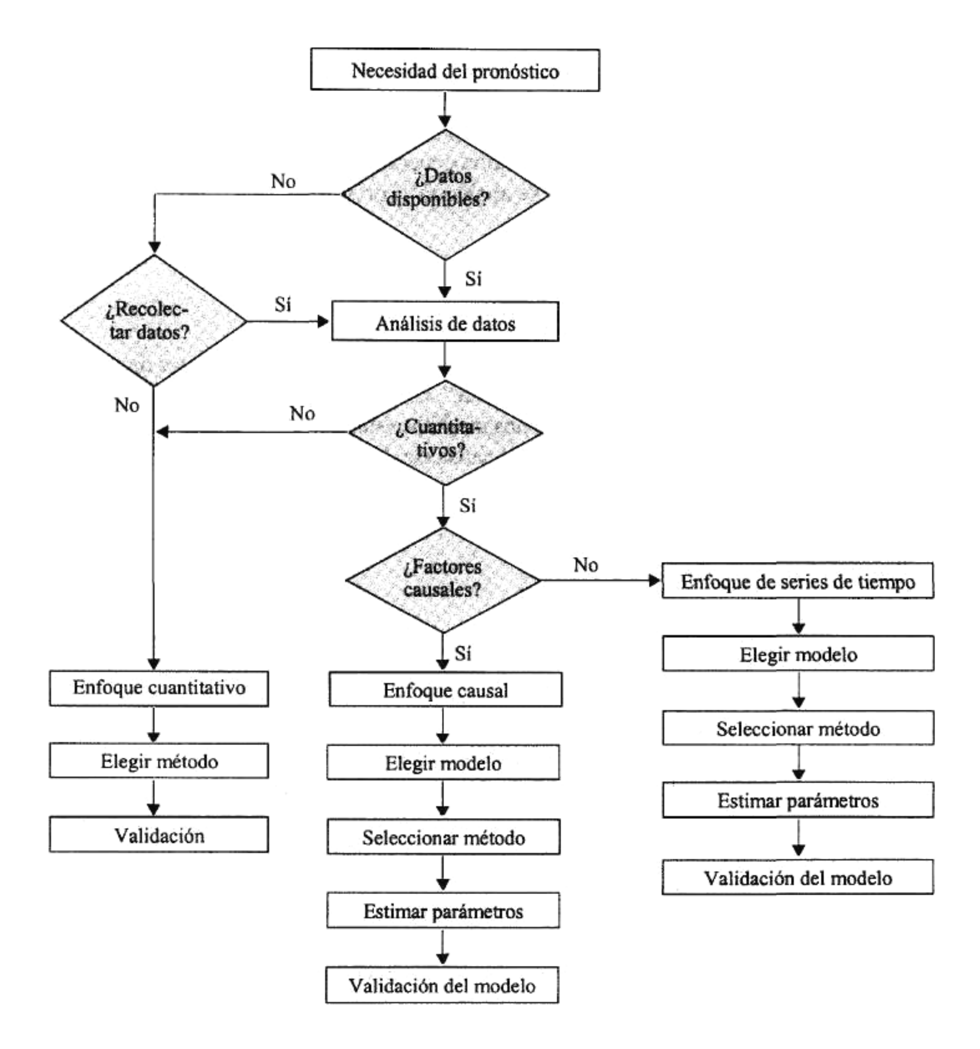


FIGURA 4-1
Diseño de un sistema de pronósticos

ceso, por lo que sólo se puede esperar conocerlo cada vez mejor y hacer las suposiciones necesarias para crear los pronósticos. Para hacer esto, se examinan las características del problema y se analizan los datos, si existen. También se establece una meta para el pronóstico.

2.2.1 Características del problema

Las principales características de un problema de pronósticos son el marco de tiempo, el nivel de detalle, la exactitud necesaria y el número de aspectos a pronosticar. Se dan ejemplos de éstas según el marco de tiempo.

En los sistemas de producción, casi siempre es de interés el pronóstico de la demanda para el producto o servicio con el fin de decidir cuánto producir. Las decisiones a largo plazo —como abrir nuevas plantas o aumentar la capacidad de las existentes—, con frecuencia dependen de un pronóstico de demanda. En este caso, los productos individuales no son los que despier-

tan interés, sino el volumen global. Por lo tanto, se pueden usar dólares como una medida agregada de las ventas. Un marco de tiempo usual para este tipo de decisiones sería de 3 a 5 años. Las decisiones a largo plazo no requieren pronósticos exactos; la decisión de construir una nueva planta se basa en la tendencia de los pronósticos para varios años sucesivos y no en una sola estimación de la demanda. Así, los pronósticos muy precisos son innecesarios. Normalmente, los pronósticos a largo plazo se hacen para una sola vez. Es común que se usen métodos causales y cuantitativos para obtenerlos.

Una decisión a mediano plazo puede ser asignar cierta capacidad de planta a grupos de productos. De nuevo, puede no ser necesario conocer la demanda para cada artículo individual, sino para grupos de artículos que comparten instalaciones de producción. Un ejemplo sería un pronóstico mensual para las llantas fabricadas en una planta; los tamaños individuales no son importantes para determinar la capacidad global. Las medidas típicas pueden ser unidades, horas de producción, galones o libras de un producto agregado. El marco u horizonte de tiempo para estas decisiones es de tres meses a uno o dos años y se requiere mayor exactitud. Las decisiones a mediano plazo normalmente requieren pronósticos para uno o dos artículos. Con frecuencia se usan métodos cuantitativos, incluyendo los causales y las series de tiempo, para los pronósticos a mediano plazo.

La decisión más común a corto plazo es cuántos productos se deben fabricar. En este caso, se necesita el número real de unidades de producto. Esta decisión puede ser semanal, mensual o tal vez trimestral. Debido a que las decisiones a corto plazo están basadas en estos pronósticos, necesitan ser razonablemente exactos. Los métodos de series de tiempo son los que se usan con más frecuencia para los pronósticos a corto plazo, pero en algunas situaciones, también son útiles los métodos causales y los cuantitativos. Las decisiones a corto plazo requieren pronósticos de cientos de artículos.

2.2.2 Datos

Examinar los datos, cuando se tienen, puede proporcionar una gran visión. Los datos pueden venir de los registros de la empresa o de fuentes comerciales o gubernamentales. Los registros de la compañía incluyen información sobre compras y ventas. Los servicios comerciales tienen acceso a bases de datos e investigaciones y pueden proporcionar datos originales o informes sobre temas específicos; un ejemplo es *A Graphic Guide to Consumer Markets,* publicada anualmente por el National Industrial Conference Board. El gobierno también proporciona muchos tipos de datos. Los datos de censos contienen información sobre población y demografía; el Department of Commerce publica *Survey of Business* cada mes. No obstante, se debe estar seguro de que los datos reflejan la situación real; por ejemplo, un registro de las ventas reales puede no incluir a los clientes que hubieran querido comprar el producto pero no pudieron porque no estaba disponible.

Si no existen datos, se deben recolectar o se puede usar un enfoque de pronósticos que no los requiera. Si no se dispone de datos o recolectarlos es demasiado costoso, se elige un enfoque cualitativo. Los métodos cualitativos, la rama izquierda en la figura 4-1, se presentan en la sección 3.

Hay factores ya sea internos o externos que afectan a los datos. Los factores externos están fuera de nuestro control pero se puede influir en los factores internos.

Un buen ejemplo de un factor externo es la economía. Si ésta experimenta una baja, por lo general la demanda de bienes y servicios también declina. Se ha definido gran cantidad de indi-

cadores económicos que pueden ayudar a entender el comportamiento de la demanda. Otros factores externos incluyen las acciones de la competencia, los productos complementarios y la elección del consumidor.

Entre los factores internos están la calidad y el precio del producto, el tiempo de entrega, la publicidad y los descuentos. Si se hace más publicidad, es probable que la demanda aumente. Los descuentos también se usan para incrementar la demanda. La baja calidad, la larga espera por los artículos o el precio alto usualmente reducen la demanda.

Los datos deben analizarse para detectar si existen factores causales. Un factor causal es algo que influye en los datos de una manera conocida y puede ayudar al pronóstico. Los datos de demanda de llantas constituyen un ejemplo de un factor causal. Si se venden más llantas a un fabricante de automóviles, el número de automóviles fabricados indicará la demanda de llantas, es decir, la producción de automóviles provoca una demanda de llantas. Una gráfica de las llantas vendidas contra los automóviles producidos indicará la validez de esta suposición. Por supuesto, las llantas también se venden a los clientes como refacciones para vehículos viejos. El pronóstico causal se muestra en la parte media de la figura 4-1; en la sección 4 se estudiará con detalle. La selección de un modelo para un enfoque causal es similar a la selección de un modelo para una serie de tiempo, por lo que se combinará el análisis. Los enfoques de series de tiempo se estudian en la sección 5.

Si se dispone de datos, se grafican para observar si existe un patrón. La figura 4-2 muestra la demanda semanal de dentífrico durante los dos últimos años. Estos datos se usan para explicar el análisis de datos de una serie de tiempo. El análisis de datos causales es similar, pero en lugar de graficar, digamos, la demanda contra el tiempo, se puede graficar la demanda contra la variable causal. Cuando se examina la gráfica parece estar nivelada, en términos burdos, con una pequeña variación, que es característica de un **proceso constante.** Como la población es relativamente estable, al menos en el corto plazo, parece razonable que las ventas de dentífrico también serán aproximadamente constantes. La variación semanal está causada por una componente **aleatoria** o **ruido** que no se puede controlar. Para un proceso en esencia constante, la componente de ruido debe tener una media de cero; si no, no es ruido, sino parte del proceso

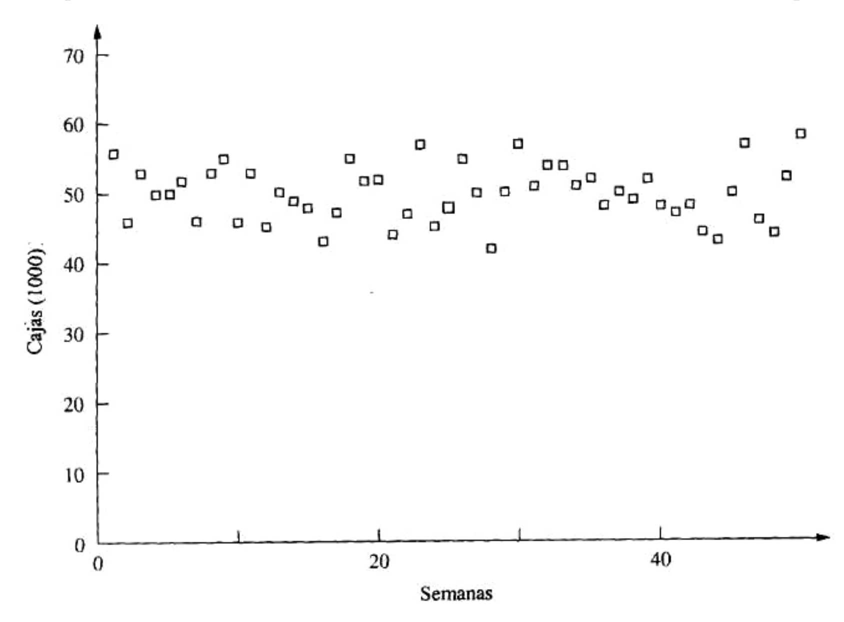


FIGURA 4-2
Un proceso constante

fundamental. De manera similar, la posibilidad de observar un valor arriba de la componente constante debe ser la misma que la de un valor debajo de ella. Si la variancia cambia con el tiempo, entonces la suposición de que es un proceso constante no es válida, así que se supondrá que la variancia del ruido es constante. Entonces es razonable suponer que el ruido sigue una distribución de probabilidad simétrica con media cero y variancia cs^{2}_{E}. Por ahora se supondrá que la componente de ruido sigue una distribución normal. En la sección 7.2 se ve que esta suposición es robusta. Pueden darse argumentos parecidos respecto a la distribución del ruido para los procesos esenciales que no son constantes.

Debemos tener una razón para suponer que un proceso es constante. Parecería que la demanda de muchos artículos sigue un proceso constante, dentífrico, leche, pan y calcetines son artículos maduros que se usan con regularidad. Los procesos constantes pueden ser útiles aun para productos que *no siempre* se usan con regularidad. En un horizonte corto, muchas cosas son aproximadamente constantes. En la etapa madura del ciclo de vida del producto (vea el capítulo 1) muchos productos exhiben ventas estables. Además, los modelos para procesos constantes constituyen una buena introducción a modelos más complicados.

Por naturaleza, algunas cosas no son constantes. Durante el ciclo de vida de un producto hay una etapa de crecimiento en la que las ventas aumentan. En forma parecida, hay un decremento o decadencia donde las ventas disminuyen. Suponer un proceso constante en cualquiera de los casos puede ser desastroso. Estos procesos son ejemplos de un **proceso de tendencia.** El crecimiento acelerado de las computadoras personales y el equipo relacionado es un buen ejemplo. La línea superior en la figura 4-3 es un ejemplo de un proceso de tendencia creciente. Las líneas que conectan los puntos no tienen significado, se agregaron para resaltar el patrón en los datos. Este crecimiento parece lineal. Al igual que en el proceso constante, la curva no es

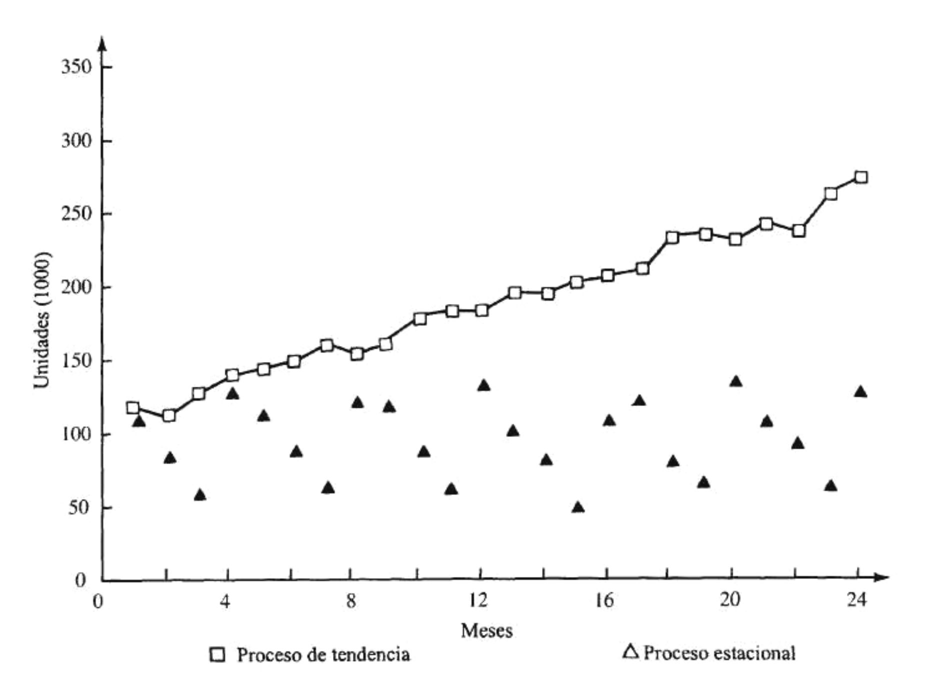


FIGURA 4-3
Patrones de demanda típicos

suave sino que tiene muchos saltos pequeños causados por la componente aleatoria. De nuevo, el solo hecho de que parezca ir hacia arriba no es razón suficiente para suponer un proceso de tendencia y debe haber alguna manera de explicarlo. La tendencia también puede ser no lineal, pero para simplificar la exposición el análisis se restringirá a tendencias lineales.

En la figura 4-3 se gráfico también un **proceso estacional.** El patrón parece repetirse cada cuatro meses, pero todavía se tienen fluctuaciones aleatorias. Un ejemplo de este tipo de proceso serían las millas-pasajero para una línea aérea. El término estacional se usa debido a que, con frecuencia, la causa es el clima; los helados y los refrescos son más populares en verano que en invierno. Algunas veces se definen procesos cíclicos; uno común es el número de llamadas telefónicas durante el día; las horas pico son a media mañana y a media tarde. Sin embargo, no se hará una distinción entre cíclico y estacional. Otra vez deberá haber una justificación para suponer un proceso estacional.

Cuando se grafican los datos, la elección de la escala es muy importante. Si se selecciona una escala equivocada, los datos de un proceso constante pueden parecer estacionales por las fluctuaciones aleatorias. Cuando la tendencia y la estacionalidad están presentes, los datos deben descomponerse para ver los efectos de cada una. Los datos disparados deben eliminarse antes de analizarlos. Un ejemplo sería las ventas que fueron altas o bajas en extremo debido un evento fuera de lo común como una huelga o un terremoto. Los distribuidores con frecuencia eliminan las temporadas especiales, como Navidad, de la serie de tiempo y los manejan como excepciones.

El resultado del análisis de datos es entender el proceso que causa la demanda. Siempre habrá alguna parte inexplicable —la componente aleatoria—. Sin embargo, el modelo que se va a usar será un resultado directo del proceso que se supuso.

2.2.3 Meta de pronóstico

La meta de cualquier sistema de pronósticos es proporcionar esos pronósticos con la exactitud necesaria, a tiempo y a un costo razonable. Un pronóstico oportuno está determinado por su utilización. El trueque básico en los pronósticos se hace entre la respuesta al cambio y la estabilidad, es decir, si se experimenta una demanda anormalmente alta una semana, debe decidirse si se requiere más producto la siguiente semana. Si la demanda alta refleja un cambio en el patrón de demanda, debe aumentarse la producción, pero si fue sólo una fluctuación aleatoria, no se aumenta. Un buen sistema de pronósticos reaccionará ante los cambios reales e ignorará las variaciones al azar.

2.3 Desarrollo de un modelo

Una vez identificados los procesos, éstos determinan la forma del modelo. Los pronósticos cualitativos no usan modelos sencillos de establecer. Los modelos causales dependen de la situación particular pero en general tienen la forma

donde d_t representa la variable dependiente, como la demanda, x, la variable independiente (o factor causal) y e, la componente de ruido en el tiempo t. La variable dependiente en el tiempo t es idealmente una función de la variable independiente en el tiempo t - k, k> 1. El lapso o

periodo k permite conocer el valor de la variable independiente antes de hacer el pronóstico de la variable dependiente; si no hay este lapso, deberá pronosticarse la variable independiente antes de obtener un pronóstico para la variable dependiente. La relación funcional entre d y x se representa por / y puede ser lineal, cuadrática o alguna otra relación matemática. Puede haber más de un factor causal.

Para los enfoques de series de tiempo, los modelos comunes que se estudian son constantes, de tendencia lineal y estacional, o combinaciones de éstos. Matemáticamente son

$$d_t = a + e, \qquad \text{(constante)}$$
$$d_t = a + bt + s_t \qquad \text{(tendencia lineal)}$$
$$d_t = ac_t + \text{E}, \qquad \text{(estacional)}$$

donde a representa la parte constante, b la tendencia, c, el factor estacional para el periodo t y e, la componente aleatoria o de ruido. Éstos son los modelos más comunes, aunque existen otros. Recuerde del capítulo 3 que los modelos deben ser tan sencillos como sea posible. Al pronosticar, intente usar el menor número de componentes en un modelo. Una función complicada puede "ajustarse" a los datos pero también tiende a ocultar las relaciones importantes. Si hay muchas componentes, el efecto de cada una disminuye y puede ser indistinguible del ruido. Como ejemplo, considere la demanda de reproductoras de CD. La mayor parte del año las ventas son relativamente constantes, pero con los regalos de diciembre las ventas se disparan. En lugar de usar un modelo complicado para captar el pico de las ventas de diciembre, se usa uno sencillo para todo el año menos diciembre y otro sólo para ese mes. En estadística, un modelo sencillo que capta la esencia del problema se llama modelo **parsimonioso.**

2.4 Solución del modelo

El primer paso al resolver el modelo es elegir un método. Si se tiene un modelo causal, el método será regresión. Para modelos de series de tiempo, existen varios métodos disponibles, incluso para el mismo proceso. Por ejemplo, existen muchos métodos para pronosticar una serie de tiempo constante.

Dado el modelo, si se conocieran los coeficientes, simplemente se podrían introducir los números correctos y obtener el pronóstico. Como los parámetros reales de la ecuación del modelo no se conocen, deben estimarse. El método que se usa determina cómo se estiman; por lo general, se estiman de manera que se minimice la diferencia entre el pronóstico y el valor real para un conjunto de datos históricos. Una vez estimados los parámetros, la aplicación del modelo a los números adecuados proporciona un pronóstico.

2.5 Interpretación e implantación de la solución

La interpretación de la solución es la tarea más importante al operar un sistema de pronósticos. La figura 4-4 muestra los pasos a seguir. Conforme se obtienen los nuevos datos, se actualiza el pronóstico. Además, se compara el pronóstico anterior con lo que realmente ocurrió para obtener retroalimentación sobre la calidad del procedimiento de pronósticos. Si la calidad es acep-

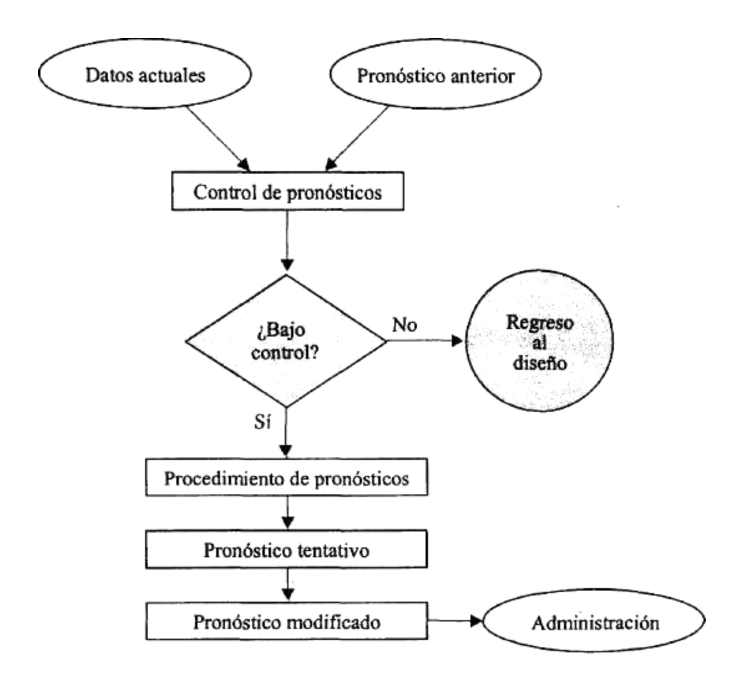


FIGURA 4-4
Operación de un sistema de pronósticos

table, se dice que el procedimiento está bajo control. Los aspectos de control se analizarán en la sección 7. Si el procedimiento está fuera de control, es necesario regresar a la etapa de diseño; se requiere volver a estimar los parámetros del modelo actual, o bien, cambiar el modelo. Si el sistema de pronósticos está bajo control, se hace un pronóstico para un periodo futuro. Un administrador (dueño) examina este pronóstico y juzga si debe aceptarse, modificarse o rechazarse.

Es importante incorporar el juicio al sistema, en especial cuando se usan métodos estadísticos. Estos métodos en esencia suponen que se está manejando un medio estable, lo cual no siempre es el caso. Por ejemplo, si está por estallar una huelga laboral, el pronóstico debe modificarse para reflejar este hecho. Fs importante que cualquier modificación la lleve a cabo la persona que toma la decisión y que se haga dentro del sistema. Si no se toman provisiones para hacer modificaciones, el pronóstico no se usará o en algún momento llevará a decisiones equivocadas.

Si un pronóstico de demanda es bajo, la demanda es de más unidades que las esperadas y ocurren faltantes o inventarios agotados. Por otro lado, un pronóstico más alto que la demanda real, cuyo resultado son demasiadas unidades, crea un inventario que se tiene que vender más barato. Fisher *et al.* (1994) señala que los costos del agotamiento y de la venta a menor precio, en los que se incurre para un artículo específico, con frecuencia exceden los costos de manufactura del producto. Si el costo del exceso de unidades (inventario) no es igual al costo de una unidad faltante, entonces es problable que el tomador de decisiones ajuste el pronóstico adecuadamente, aumentándolo si el costo de faltantes es más alto o diminuyéndolo si el costo de inventario es más alto.

2.6 Observaciones

Existen dos hechos muy importantes que recordar: los pronósticos casi nunca dan una respuesta exacta y entre más lejos al futuro se vea, menos preciso será el pronóstico. Es muy poco probable que el pronóstico de las ventas semanales de donas sea igual a las ventas reales. Por fortuna, en general no se requieren pronósticos exactos, sólo se necesita tener una idea. Un enfoque más razonable puede ser. pronosticar un intervalo de valores o la probabilidad de un grupo de valores. Podría pronosticarse la venta de 250 docenas de donas la próxima semana pero en realidad significa que las ventas deberán estar entre 230 y 270 docenas. El servicio meteorológico no informa que lloverá hoy, sino que existe una oportunidad del 60% de que llueva. Es sencillo observar, a partir del pronóstico del clima, que la exactitud de un pronóstico depende de qué tan lejano en el futuro se vea; el pronóstico para mañana normalmente es más exacto que el pronóstico para dentro de una semana.

SECCIÓN 2 EJERCICIOS

4.1. ¿Por qué es importante un pronóstico? ¿Qué papel juega en la planeación y control de la pro ducción?

4.2. ¿Cuáles son las características de un sistema de pronósticos?

4.3. ¿Cuáles son las diferencias en el diseño y la operación de un sistema de pronósticos?

4.4. Identifique las características de los siguientes escenarios de pronósticos:

a) Usted opera una tienda de periódicos en un área metropolitana, y debe decir a sus proveedores cuántas revistas le manden.

b) Usted trabaja para una compañía manufacturera que produce monitores para computadora. El departamento de planeación necesita información como ayuda para determinar si la compañía debe contratar nuevos empleados de producción.

c) Usted es dueño de un taller de trabajo sobre pedido y debe proporcionar a un cliente potencial una estimación para su pedido.

d) Su empresa desea introducir una grabadora de CD-ROM.

é) La demanda de los productos de su compañía está creciendo y la alta administración está considerando construir una planta adicional.

4.5. Dé un ejemplo de un proceso constante, un proceso con tendencia y un proceso estacional. Justifique su razonamiento.

4.6. Mencione algunos factores causales que pueden influir en lo siguiente:

a) La venta de automóviles de lujo

b) Los viajes internacionales por avión

c) El consumo de gas natural

d) La utilización de varilla de soldadura en un astillero

é) La venta de paquetes de computadora

4.7. Use una hoja de cálculo para generar 20 números para cada uno de los siguientes patrones. Grafíquelos y observe las diferencias.

a) *d,* = 100 + e,, donde e, ~$N(0, 5^2)$

b) *d,* = 100 + e,, donde e, ~$N(0,30^2)$

c) *d,* = 100 + *2t+e,,* dondee, ~$N(0,10^2)$

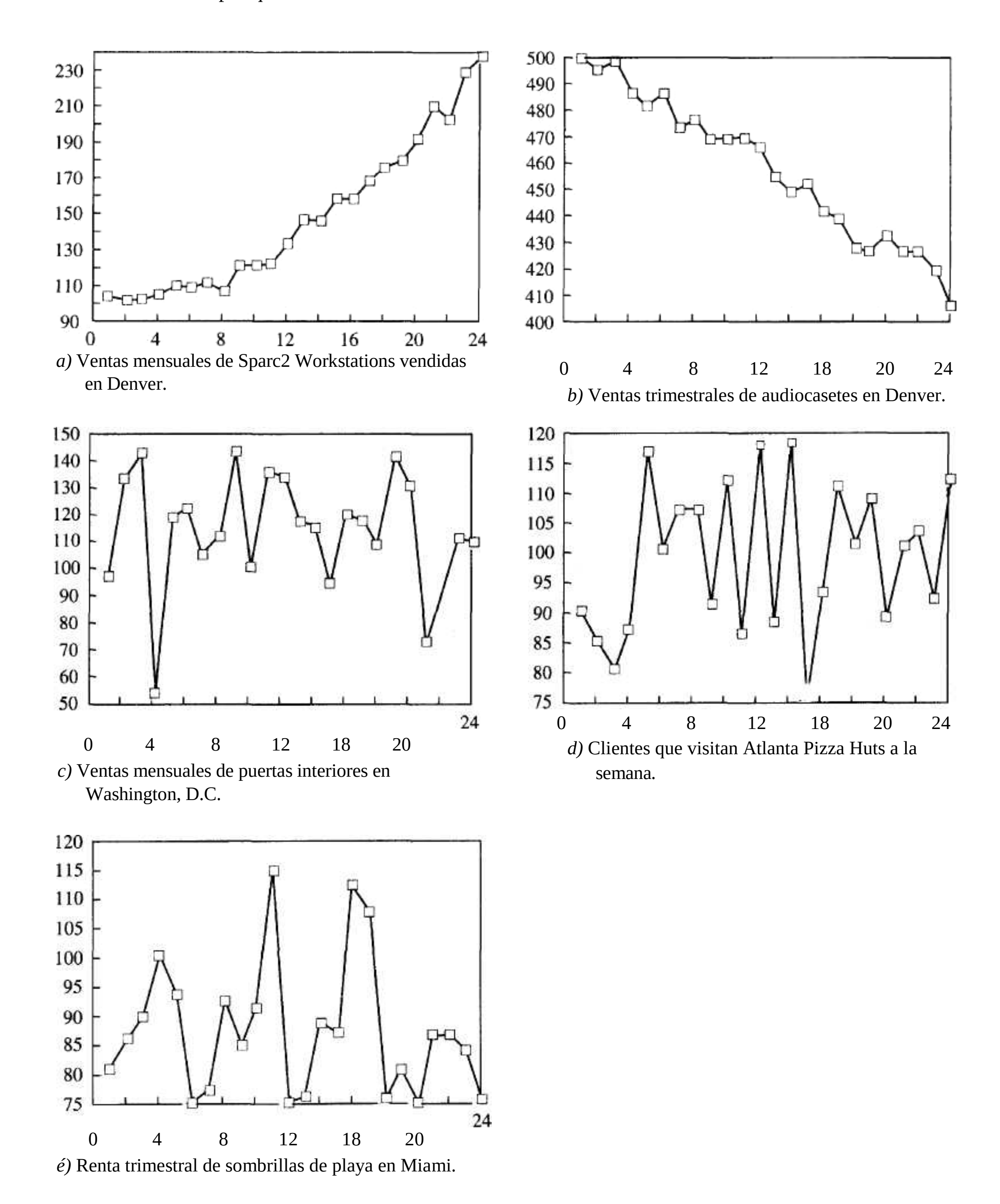
d) *d,* = 100 + 4í + e,, donde8, ~JV$(0,10^2)$

é) *d,* = 100 + t^2 + e,, donde e, ~$N(Q,10^2)$

J) d,= 100 + 20 sen (2 TT//4) + e,, donde e, ~$N(0,10^2)$ *g) d,* = 100 + 20 sen (2ití/12) + s,, donde e, ~$N(0,10^2)$

h) d_t = 100 + 40 sen (2ní/12) + e,, donde e, ~*N(0*,10^2) 0
d, = 100 + 20 sen (2n//13) + e,, donde e, ~iV(0,10^2)

4.8. Explique qué modelo usaría para pronosticar cada una de las siguientes series de tiempo. Diga además por qué usaría ese modelo.



a) Ventas mensuales de Sparc2 Workstations vendidas en Denver.

b) Ventas trimestrales de audiocasetes en Denver.

c) Ventas mensuales de puertas interiores en Washington, D.C.

d) Clientes que visitan Atlanta Pizza Huts a la semana.

é) Renta trimestral de sombrillas de playa en Miami.

4.9. Explique el papel del administrador o del tomador de decisiones en un sistema de pronósticos.

3 PRONÓSTICOS CUALITATIVOS

DeVellia es responsable de la introducción de una nueva cámara de enfoque automático. Como la calidad de las fotos que se toman con esta cámara ha aumentado significativamente en los últimos años, muchos propietarios de cámaras de lente de reflejo único (SLR) están comprando la nueva. La demanda histórica no refleja este incremento. En esta situación, ella debe usar métodos de pronóstico cualitativos, los cuales pueden incluir mandar encuestas a cierto número de clientes potenciales y analizar estadísticamente los resultados, preguntar la opinión de un experto y preguntar a muchos expertos.

3.1 Investigación de mercado

Una investigación de mercado consiste en varios pasos. Primero, es necesario desarrollar un cuestionario que debe contener preguntas cuyas respuestas proporcionen la información necesaria para determinar un pronóstico. La información sobre el cliente puede incluir su edad y sus ingresos, así como una indicación de si el cliente compraría o no el producto. Si el cliente es un distribuidor, la información puede comprender el tamaño de la tienda y la proyección del número de unidades que compraría. En la tabla 4-1 se muestra una encuesta para analizar la demanda de las nuevas cámaras de 35 mm. Junto con el diseño de la encuesta debe determinarse un método para analizar los resultados.

El siguiente paso es llevar a cabo la encuesta, la cual puede hacerse por correo, fax, correo electrónico, teléfono, una postal para recortar en una revista o en persona. La manera en que se lleve a cabo la investigación puede afectar tanto el número como la calidad de las respuestas. El número, localización y los clientes individuales que responderán deben planearse con cuidado junto con el propósito del estudio.

Una vez que se realiza la investigación, deben tabularse y analizarse los resultados. Se debe tener cuidado al interpretar estos resultados. Las tasas de respuesta pueden ser bajas, las respuestas pueden ser incorrectas, o los factores no considerados en el cuestionario pueden afectar el resultado real de los eventos. El análisis estadístico también puede ser tardado. Los resultados de la investigación sobre la cámara puede indicar que 75% de los encuestados poseen una cámara de 35 mm; 35% poseen el modelo SLR y 50% poseen la de enfoque automático. Los porcentajes no suman 100% porque algunas personas poseen ambas. Del 35% que tienen una SLR, 75% indican que comprarán la automática dentro de los próximos dos años. Extrapolando a la población las intenciones de los dueños de la SLR y de la cámara automática encuesta-

TABLA 4-1
Un ejemplo de cuestionario para estudio de mercado

Por favor, marque los cuadros apropiados:

D No poseo una cámara de 35 mm.
D Poseo una cámara SLR de 35 mm.
D Poseo una cámara de enfoque automático de 35 mm.
D Planeo comprar una nueva cámara SLR de 35 mm en los próximos dos años.
D Planeo comprar una nueva cámara de enfoque automático de 35 mm en los próximos dos años.
D No planeo comprar una nueva cámara de 35 mm en los próximos dos años.

dos, se puede obtener un pronóstico del número de cámaras con enfoque automático demandadas para los próximos dos años. Por supuesto otros factores, como la economía, pueden jugar un papel importante en las compras reales. Consulte en Kress y Snyder (1994) más detalles sobre investigaciones de mercado.

Mastio (1994) analiza una investigación basada en 24 necesidades y criterios importantes para determinar los factores que se usan en el moldeo por inyección para seleccionar un proveedor de maquinaria. Los resultados indican que la confiabilidad de la máquina y la disponibilidad de refacciones son las necesidades más importantes. Un buen servicio técnico y maquinaria fácil de operar representan otros criterios clave al seleccionar una máquina. Aunque es importante, el precio no es el factor crítico. Alrededor de 65% de los moldeadores dicen que planean comprar equipo nuevo el siguiente año. Un fabricante de maquinaria para moldeo por inyección puede hacer planes agresivos de expansión proporcionando a estos clientes lo que necesitan. Otros ejemplos de estudios de mercado para obtener pronósticos incluyen la demanda de redes de cómputo en la industria (Smith, 1994) y la demanda de productos para transmisiones de potencia, como bandas en "V", engranes y cajas de transmisión (Avery, 1993).

Recientemente se han propuesto ampliaciones y modificaciones a las técnicas de investigación de mercados. Una es usar la información en la base de datos de clientes existentes para aumentar la investigación (Ezop, 1994). Weerahandi *et al.* (1994) modifican el procedimiento para tomar en cuenta el efecto cruzado sobre la demanda de productos similares cuando se lanza un nuevo producto. Cook (1995) propone usar los estudios de mercado para tener una mejor visión con el fin de que la administración modifique los pronósticos cuantitativos.

3.2 Opinión de expertos y el método Delphi

Un método distinto sería preguntar a un experto su opinión sobre las ventas proyectadas. Tal opinión se basa en la experiencia y en el conocimiento de la situación particular. El personal de ventas y mercadotecnia son los principales ejemplos de "expertos" para el pronóstico de un nuevo producto. Una variación puede consistir en preguntar a varios expertos y usar una combinación de los resultados, digamos la mediana o el promedio, como pronóstico. Es sencillo llevar a cabo este método pero puede ser poco preciso.

Una variación más formal de la opinión de expertos es el método Delphi, llamado así en honor del Oráculo de Delfos (del griego Delphi) de la mitología griega, quien predijo eventos futuros. Un comité de "expertos" corresponde al Oráculo en esta técnica, y el facilitador determina los participantes, escribe los cuestionarios y analiza los resultados. Los miembros del comité pueden ser expertos de diferentes campos. Por ejemplo, uno puede tener orientación de ventas y otro ser un economista. Ellos ofrecen diversos puntos de vista y consideran muchos factores en el proceso. La persona de ventas tiene una buena idea de la historia de la compañía en la venta de otros artículos, mientras que el economista posee información sobre la situación económica global. Ambos factores afectan la venta de un nuevo producto.

Se pide a los miembros del comité que entreguen pronósticos anónimos de eventos específicos y, lo que es más importante, sus razones para hacer ese pronóstico. En la tabla 4.2 se da un ejemplo sencillo de un cuestionario inicial. Las preguntas deben ser ambiguas y simples. En lugar de preguntar si las ventas serán altas, debe preguntarse si estarán arriba de un valor dado. Las preguntas deben tener una sola respuesta; si se necesitan respuestas múltiples, debe hacerse una pregunta para cada una.

TABLA 4-2
Ejemplo de un cuestionario Delphi inicial

la) Al menos 25% de las secundarias en el medio oeste tendrá uno o más cursos de ritmo individual, basados en multimedia para el año________

Ib) Mis razones para dar esta respuesta son:

2a) Al menos % de las secundarias en el medio oeste tendrá uno o más cursos de ritmo individual, basados en multimedia para el año 2000.

2b) Mis razones para dar esta respuesta son:

3o) Al menos 80% de las secundarias en el medio oeste podrán pagar $_ por el equipo de apoyo para los cursos basados en multimedia para el año 2000.

3b) Mis razones para dar esta respuesta son:

Las respuestas se resumen, se modifica el cuestionario y se regresa a los miembros del comité, a quienes se pide que repitan el proceso. El cuestionario de cada ronda debe reflejar los resultados de la anterior; con el cuestionario actualizado se mandan las estadísticas resumidas, es decir, la media, la mediana y el rango. En la tabla 4.3 se muestra un cuestionario para las rondas intermedias. El procedimiento continúa hasta que los miembros del comité llegan a un acuerdo razonable —por lo general, tres o cuatro rondas son suficientes para alcanzar un consenso— y el resumen de resultados se informa a los participantes y se usa para tomar la decisión. Martino (1983) y Linstone y Turoff (1975) analizan la realización de estudios Delphi.

El método Delphi se puede usar para pronosticar la demanda de productos. Vickers (1992) los utiliza para examinar el mercado europeo de automóviles, y Stocks (1990) pronostica la demanda de CD-ROM en las bibliotecas de Australia. También puede pronosticarse la demanda de servicios con el método Delphi. El número de familias que necesitan apoyo económico (Boehm *et al.*, 1992) y los turistas que visitan una región (Kaynak y Leibold, 1994; Yong *et al.*, 1989) son dos ejemplos. Scala y McGrath (1993) usaron Delphi para identificar las ventajas y desventajas del intercambio electrónico de datos (IED) en las compañías manufactureras, y la Japan's Science and Technology Agency, líder en la aplicación del Delphi, ha encuestado cerca de 3000 científicos, ingenieros y otros expertos sobre 1200 temas distintos (Maital, 1993).

El método Delphi tiene varias ventajas, entre ellas está el hecho de que se incluye la participación de personas muy diferentes, incluso de distintas localidades, y elimina el dominio de personalidades fuertes, dando a todos la misma oportunidad de participar; las respuestas anónimas permiten una expresión más libre de las ideas. También mantiene la atención dedicada a la tarea; las respuestas escritas con frecuencia se razonan más que las verbales. Tal vez la mayor ventaja estriba en la generación y evaluación de un número más grande de ideas para el pronóstico, muchas de las cuales pueden pasarse por alto en juntas cara a cara.

La mayor desventaja es el tiempo necesario para llevar a cabo un estudio Delphi, muchas veces más de un mes; no obstante, los métodos electrónicos (fax y correo electrónico) pueden acelerar el proceso. También quita tiempo a los participantes y quizá sea difícil Inantenerlos completamente involucrados. Las ideas escritas pueden tener que aclararse o se corre el riesgo

TABLA 4-3
Cuestionario Delphi para una ronda intermedia

1) Las respuestas de la ronda anterior indican que al menos 25% de las secundarias del medio oeste tendrán uno o más cursos de ritmo individual basado en multimedia para el año 2001 *(mediana),* casi todas las respuestas están entre 1997 y 2006. *Su* respuesta anterior fue 2002.
la) Dada esta información, al menos 25% de las secundarias del medio oeste tendrá uno o más cursos de ritmo individual, basados en multimedia para el año ________ .
16) Mi respuesta varía de la mediana porque:

2) Las respuestas de la ronda anterior indican que al menos 23% *(mediana)* de las secundarias del medio oeste tendrá uno o más cursos de ritmo individual, basados en multimedia para el año 2000, casi todas las respuestas están entre 20% y 35%.
2a) Dada esta información, al menos ________ % de las secundarias en el oeste medio tendrá uno o más cursos de ritmo individual, basados en multimedia para el año 2000.
2b) Mi respuesta varía de la mediana porque:

3) En la ronda anterior, al menos 80% de las secundarias en el oeste medio podrán pagar $10 500 *(mediana)* por equipo de apoyo para los cursos basados en multimedia en el año 2000, casi todas las respuestas están entre $8200 y $13 600.
3a) Dada esta información, al menos 80% de las secundarias en el medio oeste podrán pagar $________ por equipo de apoyo para los cursos basados en multimedia para el año 2000.
36) Mi respuesta varía de la mediana porque:

de malinterpretarlas; un estudio Delphi clásico no tiene medios de aclaración. Como Delphi es un tipo de procedimiento basado en el concenso, algunas veces no se alcanzan los acuerdos.

3.3 Comentarios sobre los métodos de pronóstico cualitativos

Los métodos cualitativos se usan con frecuencia en la industria. Algunas veces, la opinión de los expertos se utiliza porque es "bastante cercana", rápida y fácil de obtener y es particularmente sensible a las tendencias del mercado. Por otro lado, los estudios de mercado y el método Delphi son tanto tardados como costosos; sin embargo, para la introducción de nuevos productos y para pronosticar avances tecnológicos, pueden ser la única opción. Si se siguen todos los pasos del método, los resultados casi siempre son bastante exactos. Un beneficio importante del pronóstico subjetivo tal vez sea que obliga un compromiso por parte de los responsables, esto es, si el jefe de ventas da una cifra, él o ella pueden trabajar mucho más para conseguir que las ventas no sean menores que el pronóstico. Las investigaciones de mercado dan buenos resultados, pero el tiempo requerido para realizarlas las hace menos adecuadas para pronósticos a corto plazo. Con el crecimiento de las redes y del acceso de los clientes a la computación interactiva, las investigaciones de mercado pueden volverse más oportunas y precisas; sin embargo, el costo debe compararse contra el beneficio que proporciona la investigación.

SECCIÓN 3 EJERCICIOS

4.10. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de las investigaciones de mercado?
4.11. El administrador de la ciudad lo ha contratado para investigar un programa de reciclado restringi do. Defina este problema desde la perspectiva de pronósticos y determine el tipo de datos que ad quiriría y cómo.
4.12. Diseñe una encuesta para el problema de pronósticos del programa de reciclado.
4.13. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas del método Delphi?
4.14. Dé tres ejemplos de situaciones en las que el método Delphi sería una manera adecuada de pronos ticar.
4.15. Diseñe un procedimiento Delphi para determinar el mercado potencial de micromáquinas como una máquina que se introduce en la corriente sanguínea para limpiar las arterias. El procedimiento debe incluir un cuestionario inicial, tipos de expertos y formas de comunicar los resultados.
4.16. ¿Qué métodos usaría para pronosticar lo siguiente?

a) Ventas del próximo año de televisores de alta definición
b) Tiempo hasta que el 95% de las casas en Estados Unidos tengan conexión a Internet
c) Número de suscriptores a una nueva revista de modas
d) Ventas en el próximo año de un refresco basado en una baya del Brasil

4 PRONÓSTICOS CAUSALES CON REGRESIÓN

Mary Cárter es gerente del departamento de plomería de la tienda Home Sales de Columbia, un distribuidor líder en productos para la construcción. Cada mes, debe colocar una orden de accesorios de plomería para baños. Si ordena más de lo que vende, los excedentes representan dinero para la empresa que no puede usar en otra parte. Si ordena muy pocos, las ventas se pierden en favor de los competidores.

Mary ha estado pensando cómo podría anticipar la demanda de accesorios. Sabe que la mayoría de los que vende son para casas nuevas; los accesorios de reposición significan menos del 6% de las ventas totales. Los accesorios de plomería se instalan uan vez que se han puesto el techo y las paredes, casi siempre alrededor de un mes después de que se emite el permiso de construcción. Como todas las construcciones necesitan el permiso, el número de permisos emitidos el mes pasado puede ayudarla a determinar el número de accesorios que debe ordenar en este mes.

Este escenario es típico de muchos problemas de pronósticos. Se desea pronosticar una variable dependiente —venta de accesorios de plomería en el ejemplo— y el valor de la variable dependiente está relacionado a un valor observable de una o más variables independientes —inicio de la construcción de casas en el ejemplo—. Esto se llama proceso de pronóstico causal, porque el valor de la variable dependiente está causada, c al menos tiene una correlación alta con el valor de la(s) variable(s) independientes.

Sin embargo, la relación entre las variables dependiente e independiente no es siempre clara. Por ejemplo, las ventas totales de una compañía pueden variar con un patrón similar al de algunos indicadores económicos. En este caso, las ventas agregadas podrían ser la variable dependiente y los distintos indicadores económicos, como la tasa de interés primaria, sería la variable independiente. Para estimar la relación, con frecuencia son útiles las técnicas de regresión. Se examinará el problema de Mary con más detalle para ver cómo se lleva a cabo este proceso.

4.1 Regresión lineal simple

Lo primero que Mary debe hacer es una gráfica dispersa de sus datos. La tabla 4-4 muestra el número de permisos de construcción de casas emitidos en el área de Columbia y el número de accesorios de plomería vendidos en su tienda, por mes, para los últimos dos años. Observe que los permisos para un mes dado están alineados con las ventas del siguiente mes ya que hay un lapso de un mes entre el permiso y la venta; esto es, las ventas de febrero dependen de los permisos de enero. En la figura 4-5 se presenta la gráfica dispersa. Esta gráfica tiene en el eje JC, los permisos de construcción ordenados en orden ascendente, y en el eje y las ventas de accesorios correspondientes. El modelo es

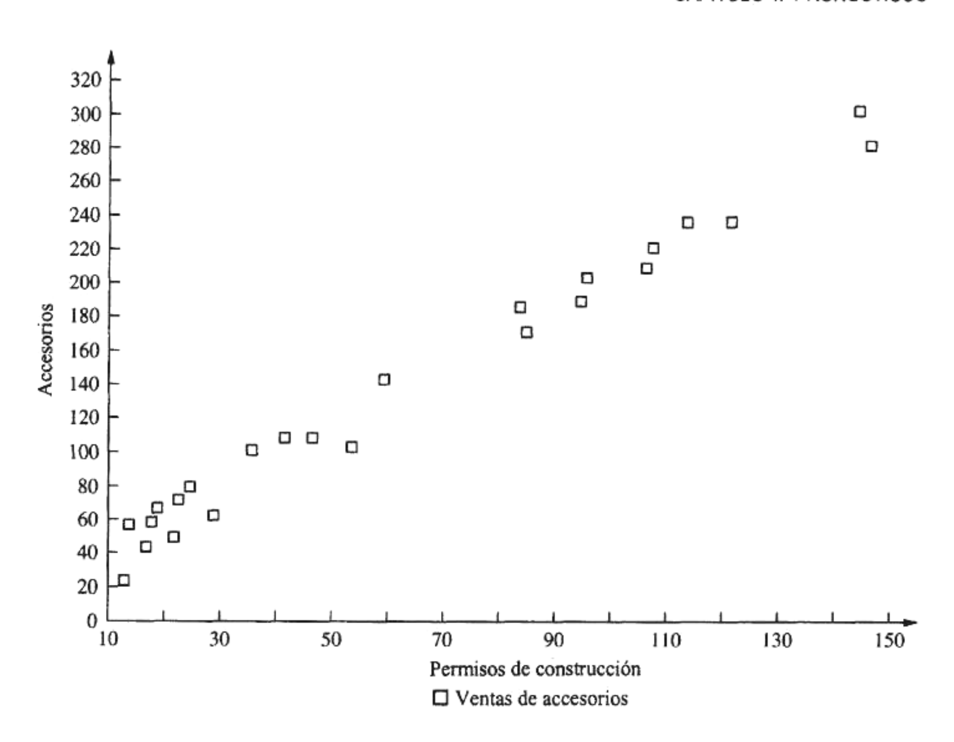
$$d_t = a + bh, + e, \qquad t = 1, 2, \ldots, n$$

donde d_t = número de accesorios vendidos en el mes t
h_t = número de permisos de construcción emitidos en el mes t - \
6, = error aleatorio en el modelo
a = ordenada de la recta que relaciona d_t y h_t
b = pendiente de la recta
n = el número total de meses de datos disponibles

TABLA 4-4
Permisos de construcción y venta de accesorios de plomería

Dato núm.	Mes del permiso	Núm. de permisos	Mes de venta de accesorios	Núm. de accesorios
1	Ene. 94	22	Feb. 94	72
2	Feb. 94	16	Mzo. 94	44
3	Mzo. 94	24	Abr. 94	80
4	Abr. 94	95	May. 94	191
5	May. 94	84	Jun. 94	187
6	Jun. 94	13	Jul. 94	57
7	Jul. 94	114	Ago. 94	238
8	Ago. 94	147	Sep. 94	283
9	Sep. 94	96	Oct. 94	204
10	Oct. 94	59	Nov. 94	144
11	Nov. 94	35	Dic. 94	102
12	Dic. 94	41	Ene. 95	109
13	Ene. 95	28	Feb. 95	63
14	Feb. 95	21	Mzo. 95	50
15	Mzo. 95	18	Abr. 95	67
16	Abr. 95	46	May. 95	109
17	May. 95	145	Jun. 95	304
18	Jun. 95	122	Jul. 95	239
19	Jul. 95	108	Ago. 95	223
20	Ago. 95	85	Sep. 95	173
21	Sep. 95	107	Oct. 95	211
22	Oct. 95	53	Nov. 95	104
23	Nov. 95	17	Dic. 95	59
24	Dic. 95	12	Ene. 96	24

FIGURA 4-5
Gráfica dispersa de permisos contra ventas



Se quiere elegir las estimaciones de *a* y *b*, digamos *a y b*, de manera que una línea recta se ajuste a los datos lo mejor posible. Para hacer esto, se minimiza la suma de los cuadrados de las diferencias entre las ventas reales y las ventas indicadas por el modelo. Esta diferencia es el "error" del pronóstico. Al elevar al cuadrado las diferencias se asegura que el valor sea no negativo, penalizando tanto las sobreestimaciones como las subestimaciones. También se da más peso a las diferencias más grandes que a las pequeñas. Así, se minimiza el error de la predicción, de forma que los errores más grandes tienen un mayor castigo.

En cualquier texto de estadística básica se encuentra que

$$\hat{b} = \frac{n\sum_{t=1}^{n} h_t d_t - \sum_{t=1}^{n} h_t \sum_{t=1}^{n} d_t}{n\sum_{t=1}^{n} h_t^2 - \left(\sum_{t=1}^{n} h_t\right)^2}$$

y

$$\hat{a} = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n} d_t - \frac{\hat{b}}{n}\sum_{t=1}^{n} h_t$$

Para calcular *b* se necesita £A,, *Ed*$_n$ *J£h*$_t$ x¿,)y Z *hf*. Estos valores se calcularon usando una hoja de cálculo (y Z *df*, que se usa después) para el problema de Mary; se dan en la tabla 4-5. De ahí se calcula

$$\hat{b} = \frac{(24 \times 294\,095) - (1508 \times 3337)}{(24 \times 140\,928) - (1508)^2} = 1.83$$

y $$\hat{a} = \left(\frac{3337}{24}\right) - \left(\frac{1.83}{24}\right)1508 = 24.17$$

Esto da como resultado la ecuación de regresión

$$d = 24.17 + 1.83/i$$

donde *d* es la estimación para el número de accesorios de plomería vendidos en un mes, tal que se emitieron *h* permisos de construcción el mes anterior. Si hay 23 inicios de construcción en enero de 1995. se esperaría vender alrededor de 24.17 +1.83 x 23 « 66 accesorios en febrero.

En general, $\hat{b}$ puede ser positivo o negativo. Un valor positivo implica que la variable dependiente aumenta conforme la variable independiente aumenta o que tienen una correlación positiva. Una *b* negativa implica lo opuesto. La magnitud de *b* debe reflejar la cantidad del cambio en la variable dependiente para una unidad de cambio en la variable independiente. Si el signo o la magnitud de *b* parecen no apropiados para la situación, piense con cuidado en el modelo.

El valor de *a* representa el valor de la variable dependiente cuando la variable independiente es cero, lo que no necesariamente tiene un significado; si cero no es un valor posible de la variable independiente, a puede ser todavía positivo. En este caso, *a* calibra los otros valores.

TABLA 4-5
Cálculos de
para los datos de

t	h_t	d_t	h_t^2	d_t^2	$h_t \times d_t$
1	22	72	484	5 184	1 584
2	16	44	256	1936	704
3	24	80	576	6 400	1920
4	95	191	9 025	36 481	18 145
5	84	187	7 056	34 969	15 708
6	13	57	169	3 249	741
7	114	238	12 996	56 644	27 132
8	147	283	21609	80 089	41 601
9	96	204	9 216	41 616	19 584
10	59	144	3 481	20 736	8 496
11	35	102	1225	10 404	3 570
12	41	109	1681	11 881	4 469
13	28	63	784	3 969	1764
14	21	50	441	2 500	1050
15	18	67	324	4 489	1206
16	46	109	2 116	11881	5 041
17	145	304	21025	92 416	44 080
18	122	239	14 884	57 121	29 158
19	108	223	11664	49 729	24 084
20	85	173	7 225	29 929	14 705
21	107	211	11449	44 521	22 577
22	53	104	2 809	10 816	5 512
23	17	59	289	3 481	1003
24	12	24	144	576	288
Total	1508	3337	140 927	621 017	294 095

El coeficiente de correlación está definido como

$$r^2 = \frac{\sum_{t=1}^{n} (\hat{d}_t - \bar{d})^2}{\sum_{t=1}^{n} (d_t - \bar{d})^2}$$

t =i

Para los datos de Mary, se tiene

$$r^2 = 0.98$$

Una r^2 de 0.98 indica un excelente ajuste porque la ecuación de regresión explica el 98% de la vanancia; esto no debe sorprender ya que estos datos no son reales, se generaron mediante un modelo lineal con una variación aleatoria. En la práctica, un coeficiente de correlación de 0.85 se considera bastante bueno.

4.2 Otros modelos de regresión

En las aplicaciones puede haber varias variables independientes que afecten la variable dependiente. Si se tienen *n* observaciones de la variable dependiente y *m* variables independientes, un modelo lineal con ruido sería

$$d, = b_0 + b_x x_{xt} + b_2 x_{2l} + \cdots + b_m x_m + e, \qquad t = 1, 2, \ldots, «$$

Se pueden estimar los valores de los parámetros $b_Q, b_x, b_2, \ldots, b_m$ usando un enfoque de mínimos cuadrados. Incluso si la relación funcional entre una variable dependiente y las variables independientes no es lineal, el modelo lineal para estimar los coeficientes es adecuado puesto, que se usan los valores de las variables independientes y no su forma.

Para el pronóstico de la demanda, las variables independientes pueden incluir población de clientes potenciales, precio y calidad. Se puede proponer un modelo como el que sigue:

$$d, = b_0 + b_x y_y + b_2 y_{2t} + b_3 y_¡, + e,$$

donde d_t — la demanda en el periodo *t*
y_u = el número de clientes potenciales en el periodo *t*
y_{2t} = el precio del artículo en el periodo *t*
y_{3t} = el número de productos defectuosos regresados en el periodo *t*
6, = el término de ruido

En este modelo, b_0 representa la porción constante del proceso, y b_x puede verse como el porcentaje de los clientes potenciales que compran el producto. Dependiendo del precio, más o menos clientes comprarán el producto. La magnitud esperada de b_2 dependerá de las unidades de precio. El modelo tiene un efecto cuadrático para la calidad; el doble del número de devoluciones tendrá un efecto del cuádruple sobre la demanda. Debido a que las ventas disminuyen cuando el número de devoluciones crece, b_3 debe ser menor que cero. Este modelo es no lineal, pero si se hace $x_{lt} = y_u$, $x_{2t} = y_{2t}$ y $x_{3t} = y_{2l}$ se puede usar el modelo lineal.

Usando la notación de matrices el modelo general se puede establecer como

Suponga que se tienen *n* observaciones de las variables dependiente e independiente:

$$\begin{matrix} d_1 & x_{11} & x_{21} & \cdots & x_{m1} \\ d_2 & x_{12} & x_{22} & \cdots & x_{m2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ d_n & x_{1n} & x_{2n} & \cdots & x_{mn} \end{matrix}$$

Sean

$$\mathbf{d} = \begin{vmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \cdots \\ d_n \end{vmatrix} \qquad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{vmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \cdots \\ \varepsilon_n \end{vmatrix} \qquad \mathbf{b} = \begin{vmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \cdots \\ b_m \end{vmatrix}$$

$$\mathbf{X} = \begin{vmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \cdots & x_{m1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \cdots & x_{m2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \cdots & x_{mn} \end{vmatrix}$$

$$d = Xb + \varepsilon$$

donde $E(\varepsilon) = 0$ y $\text{cov}(\varepsilon) = \sigma^2 I$ con I la matriz identidad. Para determinar los estimadores de b se minimiza la diferencia al cuadrado entre un valor pronosticado de demanda y su valor real. La solución general para los estimadores de mínimos cuadrados es

$$\hat{\mathbf{b}} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{d}$$

la covariancia es

$$\text{cov}(\hat{\mathbf{b}}) = \sigma^2(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}$$

y se puede demostrar que una estimación de la variancia del error es

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}'\boldsymbol{\varepsilon}}{n - m}$$

y también puede demostrarse que no es sesgada. Si se supone que los errores se distribuyen normalmente, es decir, $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2 I)$, entonces $\mathbf{d} \sim N(Xb, \sigma^2 I)$. Dado el punto

$$\mathbf{x}_t = (1, x_{1t}, x_{2t}, \ldots, x_{mt})$$

un pronóstico podría ser:

$$F_t = \hat{d}_t = \mathbf{x}_t\hat{\mathbf{b}}$$

El intervalo de predicción de 100(1 - a)% sobre el pronóstico es:

$$\hat{d}_t \pm t_{\alpha/2,\, n-m-1}\sqrt{\hat{\sigma}^2[1 + \mathbf{x}_t(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{x}_t]}$$

donde $t_{\alpha/2,\, n-m-1}$ es el límite superior de $\alpha/2$ puntos porcentuales de una distribución *t* con *n-m-l* grados de libertad. Los paquetes estadísticos para regresión múltiple ofrecen pruebas similares para la regresión simple.

Ejemplo 4-1. Deportes Meller. Deportes Meller fabrica una gran variedad de ropa deportiva: camisetas, sudaderas, pants y uniformes de nylon. Stephon está desarrollando un plan de capacidad para el año próximo y necesita saber cuántos uniformes de fútbol tendrá que hacer Meller en cada trimestre.

Solución. Primero Stephon recolecta los datos de los tres años anteriores. Estos datos, dados en la tabla 4-6, indican las ventas totales por trimestre, en donde el trimestre 12 es el último dato disponible. Las cifras de ventas están agregadas, por lo que los uniformes de nylon no están separados por equipo. Una gráfica de estos datos se muestra en la figura 4-6. Como es de esperarse, parece que las ventas siguen un patrón estacional que se repite cada año (cuatro trimestres).

TABLA 4-6
Ventas de uniformes de nylon

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1
d.	182	154	201	217	146	140	191	248	142	138	202	20

Stephon sabe que los patrones estacionales se pueden representar por pares de seno y coseno. Una onda de seno tiene un periodo 2π, de manera que para ajustaría a periodo de cuatro trimestres de las ventas de uniformes se usa sen (2 π t/4). El modelo que usa Stephon tiene la forma

$$d_t = b_0 + b_1 t + b_2 \operatorname{sen}(2\pi t/4) + b_3 \cos(2\pi t/4)$$

donde d_t = demanda en el trimestre /
b_0 = término constante
b_1 = coeficiente de tendencia
b_2 = coeficiente para el término en seno
b_3 = coeficiente para el término en coseno

Stephon estimará los coeficientes para el modelo usando regresión múltiple.

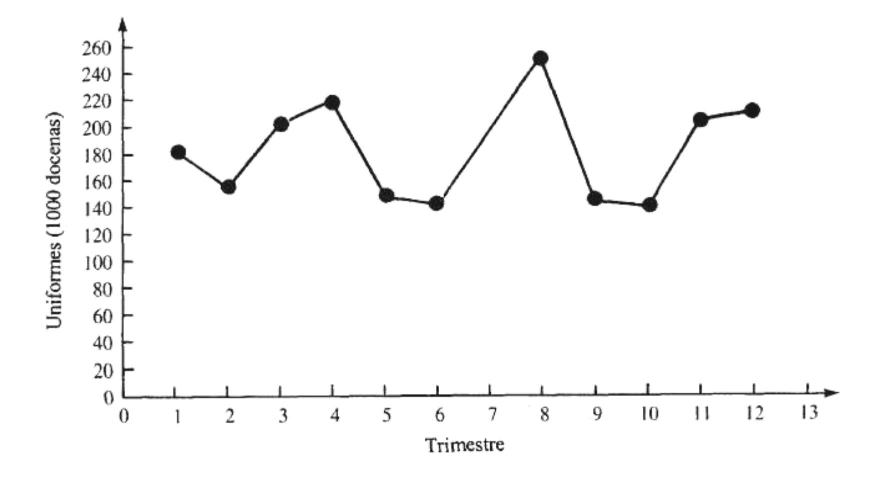


FIGURA 4-6
Ventas de uniformes de fútbol

Primero se forman la matriz **X** y el vector **b**:

$$\mathbf{X} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & \text{sen}(\pi/2) & \cos(\pi/2) \\ 1 & 2 & \text{sen}(\pi) & \cos(\pi) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & 12 & \text{sen}(6\pi) & \cos(6\pi) \end{vmatrix} \qquad \mathbf{b} = \begin{vmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{vmatrix}$$

Introduciendo números para los términos de seno/coseno y usando las cifras de demanda se tiene

$$\mathbf{X} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & -1 \\ 1 & 3 & -1 & 0 \\ 1 & 4 & 0 & 1 \\ 1 & 5 & 1 & 0 \\ 1 & 6 & 0 & -1 \\ 1 & 7 & -1 & 0 \\ 1 & 8 & 0 & 1 \\ 1 & 9 & 1 & 0 \\ 1 & 10 & 0 & -1 \\ 1 & 11 & -1 & 0 \\ 1 & 12 & 0 & 1 \end{vmatrix} \qquad \mathbf{d} = \begin{vmatrix} 182 \\ 154 \\ 201 \\ 217 \\ 146 \\ 140 \\ 191 \\ 248 \\ 142 \\ 138 \\ 202 \\ 209 \end{vmatrix}$$

Usando una hoja de cálculo se calcula

$$\hat{\mathbf{b}} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{b}$$

y el resultado es $b_0 = 192.30$, $b_1 = -1.76$, $b_2 = -22.43$ y $b_3 = 42.10$. El modelo es

$$d_t = 192.30 - 1.76t - 22.43 \text{ sen } (2\pi t/4) + 42.10 \cos (2\pi t/4)$$

Realizando la regresión en Excel, el coeficiente de correlación es $r^2 = 0.88$, lo que indica que el modelo funciona bien al explicar la variación. Las pruebas *t* para todos los coeficientes excepto b_2, el coeficiente de tendencia, son significativas en el nivel 0.01, de manera que se puede rechazar la hipótesis de que son cero. No se puede rechazar la hipótesis de que el coeficiente de tendencia es cero. El incluir o ignorar la tendencia en el pronóstico debe, seguramente, basarse en el juicio subjetivo. Con la tendencia incluida, el pronóstico para el año próximo (cuatro trimestres) sería 147 para el trimestre 13,126 para el 14,188 para el 15 y 206 para el trimestre 16. Si no se incluye la tendencia, los pronósticos serían 170,150,215 y 234, respectivamente.

4.3 Comentarios sobre regresión

Los modelos de regresión son muy útiles para pronósticos cuando existe una fuerte relación y un lapso entre la variable dependiente y la(s) variable(s) independiente(s). Si no existe un lapso entre estas variables, es decir, si ocurren en el mismo periodo, no se pueden pronosticar valores futuros de la variable dependiente a menos que se use un pronóstico de la variable independiente, y esto puede introducir un error adicional en el pronóstico de la variable dependiente. Considere el problema de Mary: si los permisos y la venta de accesorios ocurrieran al mismo tiempo,

no se puede determinar el número de accesorios demandados para el mes próximo sin conocer el número de permisos emitidos el mes próximo.

La extrapolación de los resultados de una ecuación de regresión puede ser peligrosa. Si se emitieran 200 permisos en un mes en particular, este número es más grande que cualquiera de los datos usados para ajustar la ecuación de regresión. El pronóstico resultante de la ecuación es sospechoso, porque estadísticamente sólo deben usarse valores dentro del rango de los datos usados para ajustar la ecuación.

Debe tenerse mucho cuidado al usar modelos causales. Con frecuencia, la relación causa y efecto no es clara, pero de todas maneras se usa un modelo causal. Barron y Targett (1985) analizan un caso en Inglaterra, en el que una aerolínea importante pronosticó el número de millas-pasajero usando un modelo causal con la producción manufacturera del país como valor independiente. Estadísticamente, el modelo se "ajustaba" bien, pero después de varios meses de buenos pronósticos, los resultados no se podían usar. No existía una relación causal; la producción manufacturera no causaba millas de vuelo. El modelo se ajustaba porque ambas variables aumentaban en tiempos de economía próspera. El modelo falló cuando la economía se vino abajo y la manufactura se cayó, lo que indicaba una disminución en las millas-pasajero voladas. Al mismo tiempo, el valor del dólar disminuyó en relación con la libra y muchos británicos volaron a Estados Unidos en sus vacaciones, esto aumentó el número de millas-pasajero voladas.

Si las relaciones causales no existen, la regresión no es el mejor método de pronósticos. Se examinarán otros enfoques de pronósticos en las siguientes secciones.

SECCIÓN 4 EJERCICIOS

4.17. Se ha desarrollado una ecuación de regresión para un rendimiento de cobre 99.99% puro por acre cúbico de tierra en función de la acidez del suelo. La relación es

$$y = 164 + 32.3*$$

donde y es el número de tons/acre^3 de cobre y x es la acidez del suelo.

a) Calcule el pronóstico para una parcela de tierra si su acidez es 2.2.
b) Calcule el pronóstico para otra parcela de tierra con acidez de 6.2.

4.18. Reno Shipyards repara buques transatlánticos. Muchas placas de acero grandes se sueldan juntas y a los cascos de los barcos. Cuando se acepta una licitación para un trabajo, se hace una estimación de las toneladas de acero necesarias para la reparación. Las órdenes para el siguiente mes se agre gan y se ordena el acero a la fundidora. También se ordenan varillas de soldadura. Parece razona ble que la cantidad de varillas de soldadura usadas esté relacionada con la cantidad de acero necesaria. La siguiente tabla muestra los datos para los últimos dos años de la utilización de acero (tons) y de las varillas de soldadura usadas (quintales = 46 kg).

a) Presente una gráfica de dispersión de los datos.
b) Usando regresión lineal simple, escriba una ecuación para cuántos quintales de varilla deben ordenarse para una utilización de acero proyectada.
c) ¿Piensa usted que ésta es una ecuación acertada? ¿Por qué sí o por qué no?
d) Determine la cantidad de varilla a ordenar si Reno planea usar 175 tons de acero el mes pró ximo.
é) Proporcione intervalos de confianza y de predicción para este pronóstico.

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Acero	116	104	119	96	79	78	104	103	114	92	97	110
Varilla	229	234	272	196	161	189	226	209	262	179	204	234
Mes	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Acero	114	107	99	105	94	111	108	97	90	92	88	117
Varilla	237	224	209	246	189	233	242	230	199	170	165	263

4.19. Trame Incorporated produce sistemas de aire acondicionado a la medida. Están orgullosos de que surten las órdenes de los clientes con rapidez; sin embargo, para ellos es más importante ser honestos con los clientes sobre la fecha de entrega de su orden. El tiempo de entrega es el tiempo que tomará desde aceptar la orden hasta completarla, y las órdenes en proceso actuales afectan este tiempo. Para ayudar a la fuerza de ventas a establecer fechas de entrega realistas y mejorar la programación (vea el capítulo 8), el departamento de producción quiere desarrollar un modelo para predecir el tiempo de entrega. La siguiente tabla contiene 32 observaciones del tiempo (en horas) para completar un trabajo, dado el número de trabajos en proceso actuales. ¿Qué modelo sugeriría? Justifique su respuesta. Si son cinco los trabajos en proceso, ¿cuál es la estimación?

Obs.	Pedido	Tiempo	Obs.	Pedido	Tiempo
1	6	11.40	17	17	87.70
2	9	15.74	18	10	44.53
3	17	96.38	19	12	50.98
4	6	25.53	20	14	91.46
5	7	31.20	21	6	40.63
6	18	114.27	22	18	117.87
7	8	27.18	23	7	10.56
8	8	35.49	24	6	31.02
9	15	91.95	25	8	21.65
10	9	32.03	26	13	69.48
11	6	25.97	27	15	87.06
12	12	57.74	28	14	68.83
13	5	23.78	29	19	115.78
14	7	17.70	30	15	94.45
15	18	111.33	31	18	94.70
16	11	49.57	32	18	103.40

4.20. Ron es dueño del videoclub Popcorn and Movies en un área universitaria. Los fines de semana, tiene muchos pedidos de películas populares. Sólo tiene una oportunidad de ordenar los videos, por lo que es importante que obtenga el número correcto. Demasiados atoran el dinero, pero si ordena muy pocos, los clientes irán a otro local de renta de videos. Sue, una de sus empleadas, tiene estudios en administración y piensa que existe una relación entre el número de pedidos de una película en particular y el número de boletos vendidos cuando la película se exhibió en los cines. Asegura que mientras más boletos vendidos, más alta será la demanda de renta de videos, ya que debió haber sido una buena película. Ron piensa que las personas que vieron la película en los cines no la rentarán. Para llegar a un acuerdo, Sue registra el número de pedidos de 20 películas el viernes en la noche, que es la noche de mayor demanda. También busca las ventas de boletos, en millones de dólares, para las películas. Use esta información para ayudar a Ron a decidir cuántos videos de una película en particular debe ordenar.

Número de película	**Boletos vendidos**	**Pedidos para renta**	**Número de película**	**Boletos vendidos**	**Pedidos para renta**
1	13.06	14	11	13.67	14
2	12.15	11	12	14.08	14
3	10.67	6	13	10.58	8
4	10.47	5	14	15.45	16
5	11.37	10	15	14.26	13
6	17.76	15	16	18.30	14
7	15.00	17	17	13.61	14
8	18.57	11	18	17.79	16
9	17.51	13	19	19.86	12
10	18.88	10	20	12.76	11

4.21. Armando posee naranjales en Culican. Él ha recolectado datos sobre el total de lluvias (pulgadas), la temperatura alta promedio (grados Farenheit) y la cosecha (libras/acre) para las últimas 20 temporadas. Los datos son los siguientes:

Lluvia	11	22	20	22	13	23	23	10	24	21
Temp.	91	80	88	85	94	83	82	87	84	89
Cosecha	1713	4439	5012	4741	2613	4436	4257	1520	4092	5040
Lluvia	21	19	19	25	14	24	24	22	12	18
Temp.	92	82	93	86	84	90	94	81	93	88
Cosecha	5207	5075	4971	3794	4152	4585	4854	4497	2086	4918

El pronóstico del servicio meteorológico es de 17 in de lluvia y 88°F de temperatura. Ellos confían en que la cantidad de lluvia estará entre 15 in y 20 in y la temperatura entre 85°F y 90°F. Las naranjas se procesan en un periodo de una semana al final de la temporada. Un trabajador puede procesar 800 Ib por día. Armando tiene 100 acres de naranjales y cuenta en este momento con 100 trabajadores para la semana siguiente a la temporada. ¿Qué consejo le daría sobre el nivel de su fuerza de trabajo?

4.22. Las técnicas de regresión lineal simple minimizan la suma de los cuadrados de las desviaciones de los datos respecto a la recta estimada, es decir,

$$\text{mín} \sum_{i=1}^{n} [y_i - (a + bx_i)]^2$$

Si hay uno o dos datos disparados, éstos afectarán la recta resultante porque se usa el cuadrado de la diferencia. Si se está pronosticando un proceso con tendencia que tiene mucho ruido, se puede querer disminuir el "peso" de la diferencia. Una manera de hacer esto es minimizar la suma de los valores absolutos de las diferencias, en lugar de los cuadrados. Esto es, mín X"₌, \y¡-(a + bx¡)\. Desafortunadamente, no existe una solución con una fórmula corta, pero *a yb se* pueden obtener resolviendo un modelo de programación lineal. Desarrolle un modelo de PL para estimar la ordenada y la pendiente de un recta ajustada, dadas *n* observaciones tanto de la variable dependiente *y¡* como de la variable independiente *x¡*.

4.23. Una suposición tácita de mínimos cuadrados es que una sobreestimación es igual a una subestima ción, lo cual no siempre es el caso.

á) Desarrolle un método que dé estimaciones adecuadas para un modelo de tendencia para un sistema de inventarios, si un faltante cuesta el doble que un sobrante.

b) Suponga que un producto tiene una vida esperada de un año. Los faltantes en un principio se pueden satisfacer más tarde, y los sobrantes se pueden usar para satisfacer la demanda futura.

Los pronósticos malos hacia el final de la vida del producto pueden ser más costosos debido a que puede haber productos que compiten y puede ser que los sobrantes sean desperdicio. Modifique su solución en el inciso *á)* de manera que se pueda manejar este problema.

5 MÉTODOS DE SERIES DE TIEMPO

Para pronósticos a corto plazo, se usan mucho los métodos de series de tiempo. Una serie de tiempo es simplemente una lista cronológica de datos históricos, para la que la suposición esencial es que la historia predice el futuro de manera razonable. Existen varios modelos y métodos de series de tiempo entre los cuales elegir, y que incluyen el modelo constante, de tendencia y estacional, dependiendo de los datos históricos y de la comprensión del proceso fundamental. Para cada modelo, se cuenta con varios métodos de pronóstico, que incluyen promedios, promedios móviles, suavizamiento exponencial, regresión y tal vez combinaciones de todos éstos. Debido a que debe reconocerse qué modelo es adecuado para una serie de tiempo dada, se analizará cada modelo por separado.

5.1 Proceso constante

La compañía Calgore es una de las más grandes productoras de dentífrico en Estados Unidos. Casi 50% de este producto se fabrica en su planta de New Jersey, el resto de la producción está dispersa en las otras cinco plantas en el país. El gerente de producción del dentífrico, Ned Murphy, está preocupado por cuánta pasta debe producir la semana próxima. Las cifras de ventas reales (en cajas) para las últimas 50 semanas, obtenidas del departamento de comercialización, están dadas en la tabla 4-7. Lo primero que Ned hace es graficar los datos (figura 4.7).

TABLA 4-7
Venta semanal dentífrico (en de cajas)

Semana	Demanda	Semana	Demanda	Semana	Demanda
1	56	18	55	35	52
2	46	19	52	36	48
3	53	20	52	37	50
4	50	21	44	38	49
5	50	22	47	39	52
6	52	23	57	40	48
7	46	24	45	41	47
8	53	25	48	42	48
9	55	26	55	43	44
10	46	27	50	44	43
11	53	28	42	45	50
12	45	29	50	46	57
13	50	30	57	47	46
14	49	31	51	48	44
15	48	32	54	49	52
16	43	33	54	50	58
17	47	34	51		

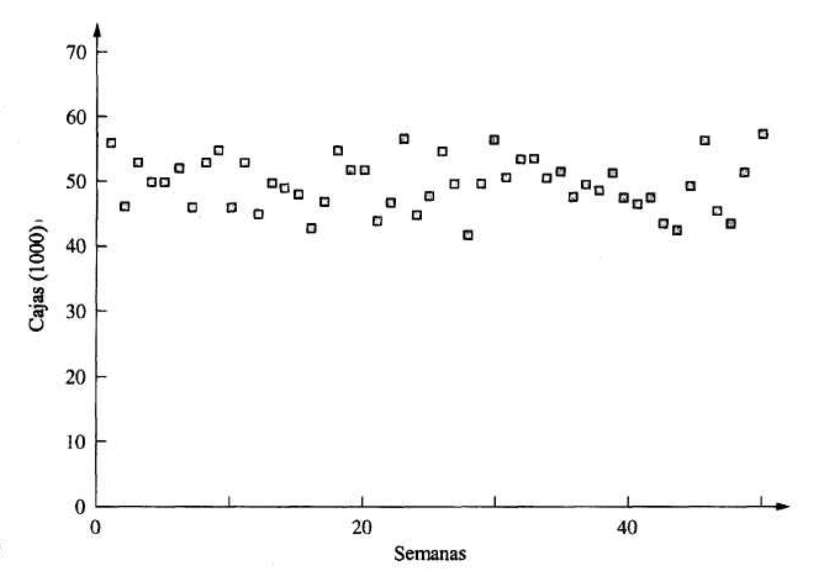


FIGURA 4-7
Gráfica de las ventas semanales de dentífrico

De la gráfica, parece que las ventas son básicamente constantes con algunas desviaciones aleatorias. Por lo tanto, se especula que el proceso es constante. Matemáticamente, la demanda en el periodo *t* se representa por

$$d_t = a + e_t$$

donde *a* representa la constante fundamental del proceso y s, el ruido aleatorio, que se supone que sigue una distribución normal con media cero y variancia a_E^2.

Se pueden usar muchos métodos para un proceso constante. Se analizará el uso del último dato, un promedio de todos los datos, un promedio de los datos más recientes y los promedios que toman en cuenta todos los datos, pero dan más peso a los datos más recientes.

5.1.1 Métodos simples

Uno de los métodos de pronóstico más sencillos es usar el último dato como pronóstico para el siguiente periodo. Sea *T* el periodo actual, / un periodo arbitrario, d_t la demanda histórica en el periodo *t* y F_{r+k} el pronóstico hecho en el tiempo *T* para *k* periodos futuros.

Al usar el último dato, el pronóstico para el siguiente periodo será la demanda de este periodo. En notación matemática esto es

$$F_{T+l} = d_T$$

Para Ned, el pronóstico de la demanda de la semana que viene sería 58, la demanda de la semana pasada. El pronóstico para *k* semanas al futuro sería también

$$F_{T+k} = d_T$$

ya que los procesos constantes deben tener una media constante y las estimaciones de la demanda futura deben ser independientes del punto en el futuro que se busque.

El problema con el último dato es la variación aleatoria inherente. Si la demanda de la última semana está en el lado alto, el pronóstico también lo está. Si la demanda de la siguiente semana es alta, el pronóstico será bueno. Sin embargo, para un modelo constante, se supuso una componente aleatoria con distribución normal y es igualmente probable que la próxima semana sea baja. En este caso, el último dato será un pronóstico malo.

Para vencer este problema, se puede usar un promedio de los datos pasados, esto haría que el pronóstico fuera menos sensible a las variaciones aleatorias. Dados T periodos de datos, el tiempo promedio en el tiempo T es

$$\overline{D}_T = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} d_t$$

El pronóstico hecho en el periodo T para el siguiente periodo es

$$F_{T+1} = \overline{D}_T$$

Para los datos de la tabla 4-7 se observa

$$\overline{D}_{50} = \frac{1}{50}\sum_{t=1}^{T} d_t = 49.88$$

Así, el pronóstico para la siguiente semana (51) será

$$F_{51} = \overline{D}_{50} = 49.88$$

Como las unidades están en miles de cajas, el pronóstico es de 49 880 cajas.

Para hacer un pronóstico para más de un periodo futuro, se usa este número porque se está trabajando con un modelo constante. Entonces, el pronóstico para k periodos futuros calculados en el tiempo T es

$$F_{T+k} = \overline{D}_T$$

Los métodos de pronósticos del último dato y del promedio se pueden considerar métodos extremos. El último dato ignora todo menos el último punto, mientras que el promedio trata a los datos muy antiguos igual que a los más recientes. Si el proceso es verdaderamente constante, es preferible un promedio porque capta la esencia de la serie de tiempo y tiende a moderar las fluctuaciones aleatorias. Si cambia el proceso fundamental el método del último dato reaccionará al cambio, pero también reaccionará a fluctuaciones aleatorias. Por otro lado, elipromedio es lento para ajustarse al cambio; pero no responde al ruido aleatorio. En seguida se examinarán algunos métodos que se quedan en el justo medio.

5.1.2 Promedios móviles

En lugar de tomar el promedio de todos los datos, se puede elegir promediar sólo algunos de los datos más recientes. Este método, llamado de promedio móvil, es un compromiso entre los métodos del último dato y del promedio. Promedia los datos más recientes para reducir el efecto de la fluctuaciones aleatorias. Como sólo usa datos recientes para el pronóstico, un promedio móvil responde al cambio en el proceso de una manera más rápida. Sea N el número de periodos que se quieren considerar en el promedio móvil y M_T el valor del promedio móvil. Si el proceso se encuentra en el periodo T, el promedio móvil está dado por la suma de los últimos N datos, o matemáticamente,

$$M_T = \frac{1}{N}(d_{T-N+1} + d_{T-N+2} + \cdots + d_T) = \frac{1}{N}\sum_{t=T-N+1}^{T} d_t$$

El tiempo en el que ocuren los datos en un promedio móvil se puede ilustrar con la siguiente recta de tiempo.

$T-N+1 \quad T-N+2 \quad \cdots \quad T-1 \quad T \quad T+1$

En el tiempo T, los puntos $T - N + 1, T - N + 2, \ldots, T$ están incluidos en un pormedio móvil de N periodos. En el tiempo $T + 1$, se agrega el punto $T + 1$ y el punto $T - N + 1$ se elimina del cálculo, de manera que el promedio incluye $T - N + 2,\ T - N + 3,\ \ldots,\ T,\ T + 1$.

En la semana 50, el promedio móvil de cinco semanas de ventas de Calgore sería

$$M_{50} = \frac{d_{46} + d_{47} + d_{48} + d_{49} + d_{50}}{5} = \frac{57 + 46 + 44 + 52 + 58}{5} = 51.4$$

Así, Ned debe planear la fabricación de 51 400 cajas de dentífrico en la semana 51, en lugar de las 49 880 cajas pronosticadas por el promedio. De nuevo, como se está usando un modelo constante, el pronóstico calculado en la semana 50 para cualquier periodo futuro sería el mismo. Formalmente, se tiene

$$F_{T+k} = M_T$$

para todos los valores de k.

El promedio móvil es una "mejor" estimación para un proceso constante, porque minimiza la suma de los cuadrados de los errores para los datos $T - N + 1,\ T - N + 2, \ldots,\ t$. Sea $\hat{a}$ el estimador de la mínima suma de cuadrados para el proceso. Entonces se quiere minimizar

$$SS = \sum_{t=T-N+1}^{T} (d_t - \hat{a})^2$$

Tomando la derivada, haciéndola igual a cero y resolviendo se tiene

$$\frac{dSS}{d\hat{a}} = \sum_{t=T-N+1}^{T} 2(d_t - \hat{a})(-1) = 0 \quad \Rightarrow \quad \hat{a} = \frac{1}{N}\sum_{t=T-N+1}^{T} d_t$$

Cuando se obtiene un nuevo conjunto de datos, se calcula un nuevo promedio móvil. Suponga que se vendieron 45 000 cajas en la semana 51. El nuevo promedio móvil de cinco semanas sería el pormedio de las ventas de las semanas 47, 48, 49, 50 y 51, es decir,

$$M_{51} = \frac{d_{47} + d_{48} + d_{49} + d_{50} + d_{51}}{5} = \frac{46 + 44 + 52 + 58 + 45}{5} = 49.0$$

Recuerde que la fórmula general para el promedio móvil de N semanas en el tiempo $T+1$ es

$$M_{T+1} = \frac{d_{T-N+2} + d_{T-N+3} + \cdots + d_T + d_{T+1}}{N}$$

Suponga que se suma $(d_{T-N+1} - d_{T-N+1})/N$ (que es cero) al lado derecho de la ecuación para M_{T+1}. Entonces se tiene

$$M_{T+1} = \frac{d_{T-N+2} + d_{T-N+3} + \cdots + d_T + d_{T+1}}{N} + \frac{d_{T-N+1} - d_{T-N+1}}{N}$$

Rearreglando términos

$$M_{T+1} = \frac{d_{T-N+1} + d_{T-N+2} + d_{T-N+3} + \cdots + d_T}{N} + \frac{d_{T+1} - d_{T-N+1}}{N}$$

$$= M_T + \frac{d_{T+1} - d_{T-N+1}}{N}$$

que es una manera conveniente de actualizar el promedio móvil. Los cálculos para loa promedio móviles para las semanas 41 a 50 se muestran en la tabla 4-8. Usando la fórmula de actualización, el promedio móvil de cinco semanas calculado en la semana 51 sería

$$M_{51} = M_{50} + \frac{(d_{51} - d_{46})}{5} = 51.4 + \frac{(45 - 57)}{5} = 49.0$$

El número de periodos, *N*, usados en un promedio móvil afecta la rapidez de respuesta del pronóstico a un cambio en el proceso. Para un proceso constante con media 50 y sin fuido, el promedio móvil será 50 para cualquier valor de *N*. Si la media del proceso cambia repentinamente a 65, el promedio móvil será 65 sólo hasta después de *N* periodos. Por supuesjto que el ruido, presente en la mayor parte de los procesos, causa que el promedio móvil sólo sé aproxime a la media después de este lapso. Para ilustrar este punto, se sumó 15a todas las obs| ervaciones de los datos de la tabla 4-7 después de la semana 10, como un cambio en el procejso. En la figura 4-8 se graficaron los promedios móviles de tres y seis semanas para las 25 seifianas de datos. El promedio móvil de tres semanas se recupera para la semana 14, pero el de seis semanas no lo hace hasta la semana 18. Lapsos similares ocurren si el proceso cambia de un patrón constante a un crecimiento o a un decremento.

Aun cuando la media permanezca constante, el promedio móvil cambiará debido al ruido. El ruido afecta relativamente poco a una *N* grande, pero el pronóstico puede cambiar fen forma más drástica si la *N* es pequeña; esto se observa en la figura 4-8; durante las semanas 18 a 24, el promedio móvil de tres semanas cambia debido al ruido aleatorio más que el promedio móvil de seis semanas.

La elección de *N* es un trueque entre la respuesta rápida a un proceso de cambio y el ignorar la fluctuación aleatoria. Si el proceso es relativamente estable, se elige una *N* grande aunque una más pequeña es mejor para un proceso que puede estar cambiando. Para el pronóstico a

TABLA 4-8
Cálculos para el promedio móvil de cinco semanas

t	d_t	M_t	d_{t+1}	d_{t-N}	M_{t+1}
41	47	49.20	48	50	48.80
42	48	48.80	44	49	47.80
43	44	47.80	43	52	46.00
44	43	46.00	50	48	46.40
45	50	46.40	57	47	48.40
46	57	48.40	46	48	48.00
47	46	48.00	44	44	48.00
48	44	48.00	52	43	49.80
49	52	49.80	58	50	51.40
50	58	51.40		57	

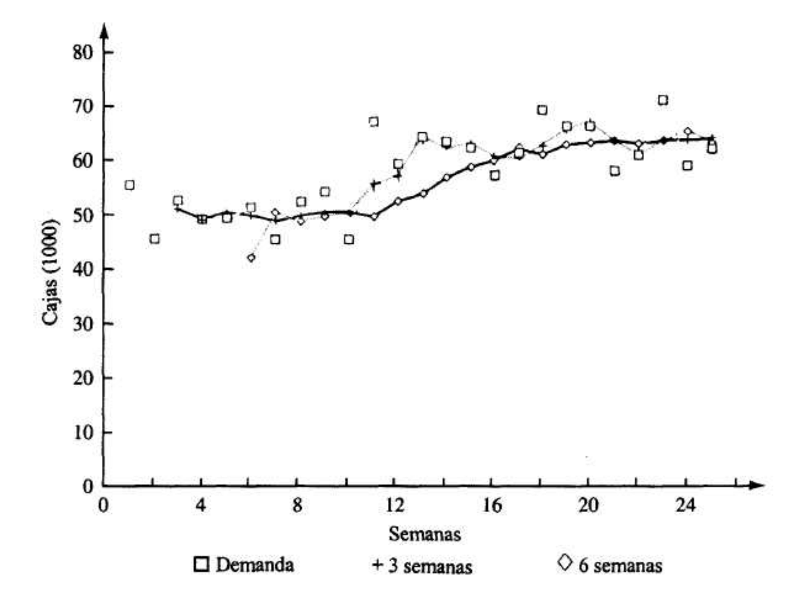


FIGURA 4-8
Comparación de promedios móviles de tres y seis semanas

corto plazo, los valores usuales de N están de 5 a 7. Por supuesto, si se sabe que el proceso esencial no es constante, debe usarse un modelo distinto.

5.1.3 Suavizamiento exponencial simple

Suponga que se quiere calcular un promedio móvil de periodo N pero no se conoce d_{T-N+l}, que se necesita en la fórmula de actualización. La única opción es estimarla; parece razonable usar el promedio móvilM_{T-X} como estimación ded_{T-N+x}. Al sustituir M_{T-X} por d_{T-N+x}, la ecuación de actualización se convierte en

$$M_T = M_{T-1} + \frac{(d_T - M_{T-1})}{N}$$

Después de reunir términos semejantes se tiene

$$M_T = \frac{1}{N} d_T + (1 - \frac{1}{N}) M_{T-1}$$

La ventaja de este enfoque es que no es necesario guardar los d?.tos individuales; se calcula el pronóstico a partir de un pronóstico anterior y el nuevo dato.

Este promedio, hablando estrictamente, ya no es un promedio móvil. Se puede ver como un promedio ponderado de los datos actuales y la estimación anterior de la media del proceso. Los pesos no tienen que ser l/N y $(1 - l/N)$; para establecer el modelo general se usará a, $0 < a < 1$, y $(1 - a)$ como los pesos o ponderaciones y el estimador se denotará por S_T. Este procedimiento se llama **suavizamiento exponencial.** La ecuación es

$$S_T = a d_T + (1 - a) S_{T-x}$$ Igual que en otros

modelos constantes, el pronóstico para el periodo $T + k$ es

$$F_{T+k} = S_T$$

De la ecuación se ve que a es el peso dado a la observación más reciente, de manera que un peso grande hará que el pronóstico sea más sensible al dato más reciente. Un valor más pequeño dará más peso a un valor "promedio". Para efectuar un suavizamiento exponencial en el tiempo *T*, se necesita un valor para S_{T_v} Aunque existen muchas maneras de estimar $S_{T_}$,, la más sencilla es promediar varios datos pasados. Por fortuna, el procedimiento no es muy sensible a esta estimación.

Ejemplo 4-2. Suavizamiento exponencial simple. Considere los datos de la tabla 4-7. Al promediar la demanda en las semanas 45 a 49 se obtiene 5_{49} = 49.8. Si se usa d_{50} y a = 0.2, se puede calcular 5_{50} como

$$5_{50} = 0.2d_{50} + (1 - 0.2)S_{49} = 0.2 \text{ x } 58 + 0.8 \text{ x } 49.8 = 51.4$$

El pronóstico para la semana próxima sería 51 400 cajas de dentífrico. Si la siguiente demanda semanal es 48, el nuevo valor de *S* sería

$$5_{51} = 0.2d_{51} + (1 - 0.2)5_{50} = 0.2 \text{ x } 48 + 0.8 \text{ x } 51.4 = 50.72$$

Para profundizar más en el suavizamiento exponencial, se expande S_T sustituyéndolo por $5^{í}_{r_}$,.Esto da

$$\begin{aligned} S_T &= \alpha d_T + (1-\alpha)(\alpha d_{T-1} + (1-\alpha)S_{T-2}) \\ &= \alpha d_T + \alpha(1-\alpha)d_{T-1} + (1-\alpha)^2 S_{T-2} \end{aligned}$$

Ahora, sustituyéndolo por S_{T-2}, S_{T-3}, etcétera, se tiene

$$\begin{aligned} S_T &= \alpha d_T + \alpha(1-\alpha)d_{T-1} + \alpha(1-\alpha)^2 d_{T-2} + \cdots + \alpha(1-\alpha)^{T-1} d_1 + (1-\alpha)^T S_0 \\ &= \alpha \sum_{t=0}^{T-1} (1-\alpha)^t d_{T-t} + (1-\alpha)^T S_0 \end{aligned}$$

Esta ecuación se puede ver como el promedio "ponderado" de todos los datos, pero debido a que a < 1, los puntos más recientes cuentan más en el promedio. De hecho, el peso decrece exponencialmente con la antigüedad de los datos, de ahí el nombre de suavizamiento exponencial.

La figura 4-9 presenta una gráfica de los pesos dados a los datos contra su antigüedad para cuatro valores diferentes de a. Los valores grandes de a dan un mayor peso a los datas nuevos y el dato más antiguo desaparece rápidamente. De esta figura se ve que si a = 0.5, entonces el peso para un dato del periodo anterior, es alrededor de 0.26, el cual es casi tres veces más grande que el peso para el mismo dato si a = 0.1. Si en verdad se tiene un proceso constante, lo mejor será un valor pequeño de a para que las fluctuaciones aleatorias se eliminen. Sin embargo, si no hay seguridad sobre el proceso, se puede usar un valor más grande. Usualmente se usan valores de a entre 0.1 y 0.3; si se requiere un valor más grande, la suposición de un proceso constante es cuestionable y deben considerarse modelos más complejos.

La elección de a es un trueque entre estabilidad y respuesta. Se podría concebir determinar valores "óptimos" para a si se pudieran establecer "costos" para la estabilidad y la respuesta. Un costo alto para la respuesta al ruido aleatorio indica que debe usarse un a más pequeña, mientras que un alto costo por no responder a cambios verdaderos en el proceso llevaría a

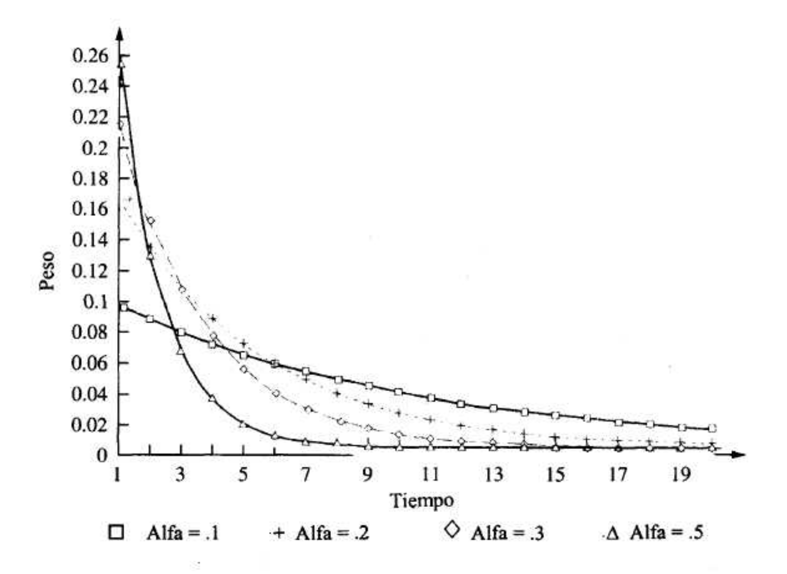


FIGURA 4-9

Pesos exponenciales

una grande. Algunos programas de pronósticos pueden asignar el parámetro de suavizado por sí solo. Los datos se dividen en dos grupos; el primero se usa para iniciar el procedimiento de pronóstico, después se obtienen los pronósticos para el segundo grupo de datos usando un valor particular de a. Los resultados se tabulan y se repiten los experimentos para valores distintos de a. Se elige el valor de a que dio los resultados más exactos para el sistema de pronósticos. Para justificar S_T como el pronóstico de un modelo constante, considere la esperanza:

$$E[S_T] = E[\alpha\sum_{t=0}^{\infty}(1-\alpha)^t d_{T-t} + (1-\alpha)^T S_0]$$

$$= E[\alpha\sum_{t=0}^{\infty}(1-\alpha)^t d_{T-t}] + E[(1-\alpha)^T S_0]$$

La esperanza de una constante es justo la constante, lo que da

$$E[S_T] = \alpha\sum_{t=0}^{\infty}(1-\alpha)^t E[d_{T-t}] + (1-\alpha)^T S_0$$

Cuando T crece, $(1-\alpha)^T$ se acerca a cero, de manera que el término en S_0 se acerca a cero y puede ignorarse, con lo que queda

$$E[S_T] = \alpha\sum_{t=0}^{\infty}(1-\alpha)^t E[d_{T-t}]$$

Recuerde que, en nuestro modelo, $d_t = a + \varepsilon_t$, donde a es una constante y $E[\varepsilon_t] = 0$, de manera que se tiene

$$E[d_{T-1}] = E[a + \varepsilon_{T-t}] = a + E[\varepsilon_{T-t}] = a$$

Debido a que

$$\alpha \sum_{t=0}^{\infty} (1-\alpha)^t = \frac{\alpha}{1-(1-\alpha)} = 1$$

se tiene

$$E[S_T] = a$$

Así, S_T es una estimación del término constante de un modelo constante.

Se define la edad ponderada de una observación como el peso dado a la observación en el pronóstico multiplicado por el número de periodos que dista del presente. En un promedio móvil, cada una de las *N* observaciones más recientes tiene un peso igual (1/iV) y las observaciones anteriores no reciben ningún peso. Suponga que la observación más reciente tiene: 0 periodos de edad, la observación anterior 1 periodo de edad, y así sucesivamente; la observación más antigua que se toma en cuenta en un promedio móvil de *N* periodos tiene *N*-\ peijiodos de edad. Entonces, la edad promedio ponderada de los datos en promedio móvil de *N* periodos es

$$\bar{t} = \frac{0}{N} + \frac{1}{N} + \cdots + \frac{N-1}{N} = \frac{N-1}{2}$$

Para el suavizamiento exponencial, se define la edad de la misma manera, pero todos lo datos se toman en cuenta en la estimación, aunque tengan diferente peso. El peso de la observación actual esa,el de una observación de un periodo de edad es ct(l - a), etcétera. Para el suavizamiento exponencial, la edad del promedio ponderado de una observación es

$$\begin{aligned}\bar{t} &= 0\alpha + 1\alpha(1-\alpha) + 2\alpha(1-\alpha)^2 + \cdots \\ &= \sum_{t=0}^{\infty} t(1-\alpha)^t \\ &= \frac{(1-\alpha)}{\alpha}\end{aligned}$$

Una manera de igualar los métodos de promedios móviles con los de suavizamiento exponencial sería tener la misma edad del promedio ponderado. Si se igualan las dos edades del promedio ponderado y se despeja α en términos de *N*, se tiene

$$\frac{1-\alpha}{\alpha} = \frac{N-1}{2}$$

lo que implica

$$\alpha = \frac{2}{N+1}$$

La tabla 4-9 contiene valores "equivalentes" *áeNya* .Usar *N* = *a* = 1 es lo mismo que usar el método de pronósticos del último dato. Cuando *N* crece, a decrece. !

TABLA 4-9
Valores equivalentes de *N* y α

N	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
α	0.67	0.50	0.40	0.33	0.29	0.25	0.22
N	**9**	**10**	**20**	**30**	**52**	**104**	**208**
α	0.20	0.18	0.10	0.06	0.04	0.02	0.01

TABLA 4-10
Ventas de papel de computadora (en cajas)

Mes	Ventas	Mes	Ventas	Mes	Ventas
1	116	9	163	17	210
2	133	10	163	18	207
3	139	11	164	19	225
4	157	12	191	20	223
5	154	13	201	21	257
6	159	14	219	22	232
7	162	15	207	23	240
8	172	16	205	24	241

Si es necesario elegir un valor grande de a o un valor pequeño de *N*, la suposición de un modelo constante puede ser cuestionable. Otro proceso común, el de tendencia, se puede modelar como una ecuación lineal. En la siguiente sección se estudiará este proceso, su modelo y los métodos de solución asociados.

5.2 Proceso con tendencia

La tabla 4-10 proporciona los datos de demanda de papel de computadora, y la figura 4-10 es un gráfica de estos datos. Un examen de los datos indica claramente que el proceso no es constante sino que aumenta en forma estable, lo que no es sorprendente debido al creciente uso de computadoras personales. Para pronosticar con exactitud esta serie de tiempo, se necesita un modelo que incorpore esa tendencia. El modelo para un proceso con tendencia lineal está dado por

$$d_t = a + bt + \varepsilon_t$$

en donde *b* es la pendiente de la tendencia y el resto de la notación se definió antes. Si *b* es positivo, el proceso crece a través del tiempo, y una ¿negativa implica un proceso que decrece. Se

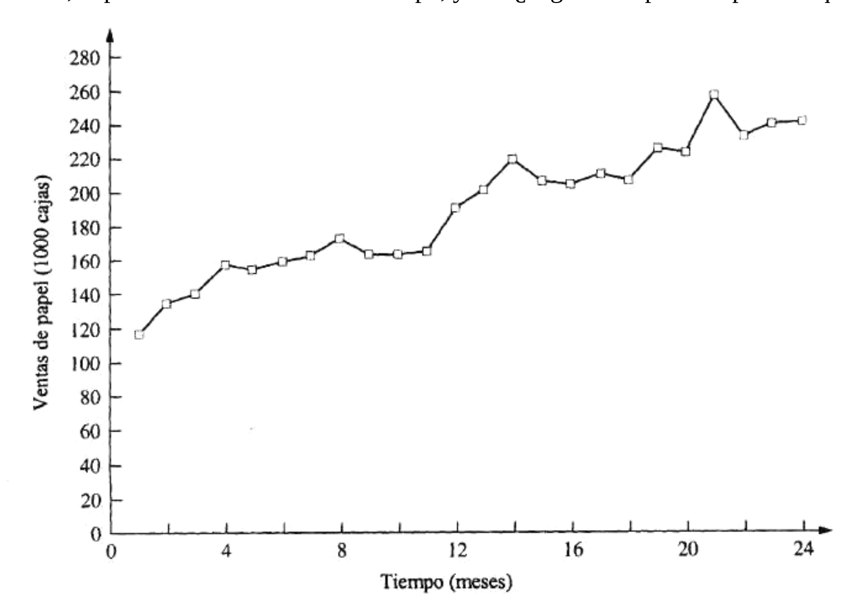


FIGURA 4-10
Ventas de papel de computadora

analizará la tendencia creciente, pero la metodología también se aplica a la tendencia) decre ciente.

Para hacer un pronóstico cuando existe una tendencia, es necesario estimar la constante y la pendiente; hay muchas formas de hacerlo, incluyendo regresión y variaciones a promedios móviles y suavizamiento exponencial. Se verá aquí una modificación de suavizamiento exponencial para tendencia.

5.2.1 Suavizamiento exponencial doble

Si se tuviera que pronosticar un modelo con tendencia usando suavizamiento exponencial simple, el pronóstico tendría una reacción retrasada al crecimiento. Entonces, el pronóstiqo tendería a subestimar la demanda real. Para corregir esto se puede estimar la pendiente y multiplicar la estimación por el número de periodos futuros que se quieren pronosticar. Una simple estimación de la pendiente daría la diferencia entre las demandas en dos periodos sucesivos! sin embargo, la variación aleatoria inherente hace que esta estimación sea mala. Para reducir ¡el efecto de aleatoriedad se puede usar la diferencia entre los promedios calculados en dos periodos sucesivos. Usando suavizamiento exponencial, la estimación del promedio en *TQSS*$_T$, dp manera que la estimación de la pendiente en el tiempo *T* (vea la figura 4-11) sería

$$B_T = (S_T - S_{T-1})$$

Con esta idea una vez más, se puede usar suavizamiento exponencial para actualizar la estimación de la tendencia, lo que lleva al suavizamiento exponencial doble, representado por el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$S_T = \alpha d_T + (1-\alpha)(S_{T-1} + B_{T-1})$$
$$B_T = \beta(S_T - S_{T-1}) + (1-\beta)B_{T-1}$$
$$F_{T+k} = S_T + kB_T$$

Observe que el pronóstico para *k* periodos futuros consiste en la estimación de la ¡pendiente más una corrección por tendencia.

Debe elegirse uno de los dos parámetros, a y (3,para el suavizamiento exponencial doble. Los comentarios sobre la elección de a en el suavizamiento exponencial simple son válidos para ambos parámetros en este caso.

Para obtener un suavizamiento doble en el tiempo *T,* se necesitan los valores de S_T _, y ¿?$_r$ _,. Existen muchas formas de obtenerlos; se estudiará una sencilla. Primero se dividen los datos en dos grupos iguales y se calcula el promedio de cada uno. Este promedio se centra en el

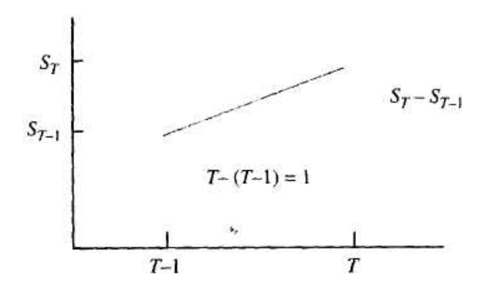


FIGURA 4-11
Estimación de la pendiente

punto medio del intervalo; si hubiera 12 datos en el grupo, el promedio estaría en 6.5. La diferencia entre los dos promedios es el cambio en la demanda respecto a la media de cada conjunto de datos. Para convertir esta diferencia en una estimación de la pendiente, se divide entre el número de periodos que separan los dos promedios. Después, para obtener una estimación de la ordenada, se usa el promedio global y la estimación de la pendiente por periodo multiplicados por el número de periodos a partir del punto medio del periodo actual. Es más fácil entender este proceso usando un ejemplo.

Ejemplo 4-3. Suavizamiento exponencial doble. Desarrolle un pronóstico para las ventas de papel de computadora para los meses 25 y 30. Si la demanda del mes 25 es 259, actualice los parámetros y proporcione los pronósticos para los meses 26 y 30.

Solución. Considere los datos de la tabla 4-10. Primero, se calculan los promedios de los meses 1 a 12 y 13 a 24. Éstos son 156.08 y 222.25, respectivamente. El incremento en las ventas promedio para el periodo de 12 meses es 66.17 (= 222.25 - 156.08). Al dividir este número entre doce se obtiene 5.51, el incremento promedio por mes. Así, la estimación de la pendiente en el tiempo 24 será B_{24} = 5.51. Para obtener una estimación de la ordenada, se calcula el promedio global de los 24 datos, que es 189.16. Este promedio está centrado en el mes 12.5. Para moverlo al tiempo actual se suma el ajuste por tendencia de 5.51 cajas por mes multiplicado por (24 - 12.5) meses. La estimación de la ordenada es

$$S_{24} = 189.16 + 5.51(24 - 12.5) = 258.09$$

Una vez que se tienen los valores iniciales, se pueden pronosticar periodos futuros. El pronóstico para el periodo 25 es

$$F_{25} = S_{24} + 1 \times B_{24} = 258.09 + 1 \times 5.51 = 263.60$$

De manera similar, el pronóstico para el mes 30 es

$$F_{30} = 258.09 + 6 \times 5.51 = 291.17$$

Cuando se conoce la demanda real para el mes 25, se actualizan las estimaciones. Si la demanda real para el mes 25 es 259 y $\alpha = \beta = 0.1$, la nueva estimación de la ordenada será

$$S_T = \alpha d_T + (1 - \alpha) S_{T-1} = \alpha d_{25} + (1 - \alpha)(S_{24} + B_{24})$$

o

$$S_{25} = 0.1 \times 259 + (1 - 0.1) \times (258.09 + 5.51) = 263.14$$

La nueva estimación de la pendiente será

$$B_T = \beta(S_T - S_{T-1}) + (1 - \beta) B_{T-1} = \beta(S_{25} - S_{24}) + (1 - \beta) B_{24}$$

o

$$B_{25} = 0.1 \times (263.14 - 258.09) + (1 - 0.1) \times 5.51 = 5.46$$

El pronóstico para el periodo 26 estará dado por

$$F_{26} = 263.14 + 1 \times 5.46 = 268.60$$

y el pronóstico para el mes 30 es ahora

$$F_{30} = 263.14 + 5 \times 5.46 = 290.46$$

Con frecuencia, las aplicaciones (vea la sección 9) requieren pronósticos para cientos o miles de artículos. Generar pronósticos para muchas series de tiempo distintas puede requerir un tiempo de computadora significativo. El suavizamiento exponencial doble es muy sencillo de calcular y requiere poco tiempo y espacio. La exactitud es aceptable para la mayor parte de los problemas de pronóstico a corto plazo.

5.2.2 Otros métodos

Existen otros métodos para pronosticar un proceso con tendencia. En general, difieren en la forma de determinar las estimaciones de la constante y la pendiente. Por ejemplo, el método de promedio móvil doble es similar al suavizamiento exponencial doble; estima la constatite con un promedio móvil estándar y la pendiente con un promedio móvil de las estimaciones anteriores de la pendiente, corregidas por la constante.

También se puede usar regresión con el tiempo como variable independiente. Sea d, la demanda en el periodo/, t = 1, 2,..., T. Como la variable independiente es un índice de tiempo, la ecuación de regresión se simplifica y se convierte en

$$\hat{b} = \frac{\left(T\sum_{t=1}^{T} td_t - \frac{1}{2}(T(T+1))\sum_{t=1}^{T} d_t\right)}{\frac{1}{6}(T^2(T+1)(2T+1)) - \frac{1}{4}(T^2(T+1)^2)}$$

y

$$\hat{a} = \left(\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} d_t\right) - \left[\frac{\hat{b}}{2}(T+1)\right]$$

Como $\hat{a}$ se calcula para el tiempo cero, debe sumarse $\hat{b}T$ para moverlo al tiempo T. Entonces el pronóstico hecho en el tiempo t para k periodos futuros sería

$$F_{t+k} = \hat{a} + \hat{b}k$$

Debe tenerse cuidado al usar regresión para pronosticar procesos con tendencia con el tiempo como variable independiente. Puede no haber un apoyo de causa y efecto, o no existir correlación, entre el tiempo y la variable dependiente. Las ventas pueden aumentar con el tiempo, pero éste puede no ser la causa del incremento; las buenas condiciones económicas pueden causar el aumento en las ventas. Si la economía baja, lo más probable es que las ventasbajen, y un modelo de regresión con el tiempo como variable independiente continuará pronosticando un aumento por algún tiempo. Para pronosticar con una regresión basada en el tiempo, debe extrapolarse fuera de la región de observación, lo cual es peligroso. Aun así, se usa la regresión basada en el tiempo.

5.3 Proceso estacional

Outdoor Furniture fabrica columpios. Usualmente los clientes compran más columpios en los meses calientes que en los fríos, de manera que las ventas cambian con las estaciones. Suponga que los columpios de Outdoor Furniture son muy buenos y la publicidad verbal hace que aumente el número de personas que los compran. Sus datos, que reflejan estacionalidad y tendencia están dados en la tabla 4-11 y graneados en la figura 4-12.

En este caso, un año se puede dividir en cuatro estaciones, cada una de tres meses. Por naturaleza, muchos procesos tiene algún número de estaciones durante un año. Si los periodos son semanas, el año tendría 52 estaciones. Los periodos de meses y de trimestres tienen 12 y 4 estaciones en un año, respectivamente. Otros procesos pueden tener una estación quie no esté basada en años, pero debe haber alguna explicación de la estacionalidad. Los métodos presentados aquí pueden usarse para cualquier longitud de estación.

TABLA 4-11

de los columpios de Outdoor Furniture

	Año		
Trimestre	**1**	**2**	**3**
1	60	69	84
2	234	266	310
3	163	188	212
4	50	59	64
Promedio anual	126.75	145.50	167.50
Promedio global			146.58

Para resaltar la estacionalidad y la tendencia, en la figura 4-13 se muestra la gráfica por estación. La demanda para cada trimestre del primer año es menor que la demanda del mismo trimestre del segundo año, y el valor del segundo año es menor que el del tercer año; parece que la demanda está creciendo. Un buen modelo debe considerar la porción constante de la demanda, la tendencia y la estacionalidad.

Varios métodos consideran los tres factores; se estudiará un modelo multiplicativo popular propuesto por Winters (1960). Formalmente, el modelo es

$$d_t = (a + bt)c, +e,$$

donde a = porción constante
b = pendiente de la componente de tendencia c_t
= factor estacional para el periodo t e, =
aleatoriedad no controlable

El método de pronósticos consiste en estimar los parámetros del modelo y usarlos para generar el pronóstico. La componente constante se estima en forma independiente de la tendencia y los factores estacionales, por lo que se llama constante no estacional. De la misma manera, el factor de tendencia debe ser independiente de los factores estacionales. Los factores estacionales se pueden ver como un porcentaje de las componentes constante y de tendencia para el periodo *t;* si la demanda en un periodo dado de una estación es menor que la componente de tendencia/constante, el factor estacional será menor que uno, y si la demanda es mayor, será mayor que uno. El número de factores estacionales debe ser igual al número de estaciones al

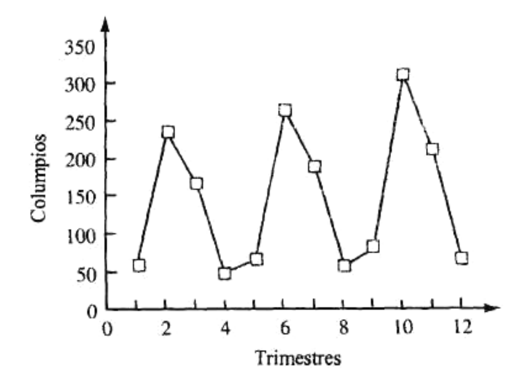
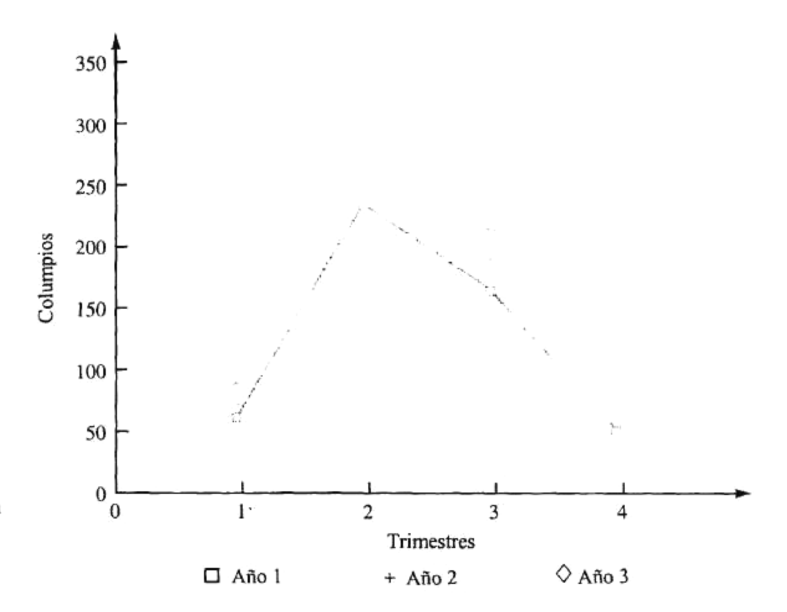


FIGURA 4-12
Datos estacionales con tendencia



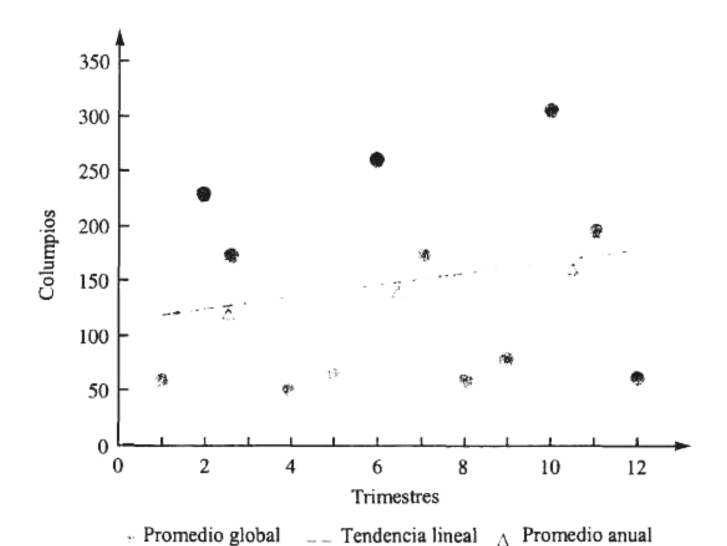
Datos estacionales con tendencia graficados por estación

año. Para pronosticar, se obtienen las estimaciones iniciales de las componentes del modelo y se actualizan usando suavizamiento exponencial.

Sea d_t = demanda en el periodo t
L = número de estaciones en el año (o en otro marco de tiempo)
T = número de periodos de datos disponibles; $T = mL$ donde m es el número de años completos de datos disponibles
5, = estimación para el término constante a calculado en el periodo t B_t
= estimación del término de tendencia b calculada en el tiempo t C_t =
estimación de la componente estacional para el periodo t

Para comenzar el procedimiento, se necesita un valor inicial de S_T .Una estimación natural es un promedio de los datos de una o más estaciones completas. No debe usarse unja parte de una estación; si se usan sólo los primeros 9 datos puede obtenerse una mala estimación, porque una demanda mayor o menor en el primer trimestre no refleja la demanda "promedio". Cuando hay tendencia, el promedio de uno o más años históricos completos no proporciona una estimación inicial de *a*. Este promedio incluye la demanda "más baja" del principio, lo mismo que la demanda "más alta" del final de los datos históricos. El signo "+" en la figura 4-14 es; el promedio gobal y está localizado en 6.5, el punto medio de los datos históricos. Para determinar la porción constante del proceso en el tiempo T debe corregirse por tendencia. Por lo tanto, para calcular S_T, la estimación de a, se necesita B_T, la estimación de *b.*

Se requieren al menos dos años completos de datos para calcular B_T; con menos datos no se verá la diferencia entre la tendencia y la componente estacional. Se calcula la dertianda promedio para cada uno de los dos últimos años y se resta el promedio del más antiguo del promedio del más reciente. El resultado es el "crecimiento" en los dos años, que debe convertirse en un crecimiento estacional dividiendo entre L, el número de estaciones por año. Si se cuenta con más de dos años de datos, pueden usarse cualesquiera de ellos para estimar la pendiente. Si se usan el primero y último, con m años de datos disponibles, se divide entre *(m- \)L* en lugar de L para obtener el crecimiento por periodo.



Ajuste de la tendencia en datos

Ejemplo 4-4. B_T y S_T iniciales para Outdoor Furniture. Determine los parámetros iniciales para el método estacional de Winters usando los datos en la tabla 4-11.

Solución. El promedio del tercer año (últimos cuatro datos) es

$$\bar{d}_3 = \frac{d_9 + d_{10} + d_{11} + d_{12}}{L} = \frac{84 + 310 + 212 + 64}{4} = 167.5$$

El promedio para el segundo año es d_2 = 145.5. Restando el promedio para el año 2 del promedio para el año 3 se obtiene el crecimiento de un año. Estos promedios se "centran" en el punto medio de cada año, los periodos 6.5 y 10.5, respectivamente; de manera que hay un año entre ellos. Se divide entre 4 para obtener el crecimiento por periodo. Se tiene

$$B_T = \frac{\bar{d}_3 - \bar{d}_2}{L} = \frac{167.5 - 145.5}{4} = 5.5$$

Dada una estimación de la tendencia, se puede calcular una estimación de la componente constante. El promedio de todos los datos se centra en *(T* - l)/2, el punto medio de las observaciones (6.5 en la figura 4-14), o (7" - l)/2periodos de *T*, el tiempo presente. Se puede estimar la porción constante del modelo en el tiempo *T* multiplicando la tendencia por periodo, B_T, por *(T* - l)/2, el número de periodos que hay entre el centro y *T.* Vea la figura 4-14.

Para el ejemplo, el promedio global es

$$\bar{D} = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} d_t = \frac{1}{12}\sum_{t=1}^{12} d_t = 146.58$$

Como hay doce periodos de datos, *D* está centrado en el periodo 6.5, de manera que la estimación inicial del término constante, S_T, en el periodo 12 sería

$$S_T = \bar{D} + \left(\frac{T-1}{2}\right)B_T = 146.58 + \left(\frac{11}{2}\right)5.5 = 176.83$$

Una vez que se tienen S_T y B_T ,una estimación natural del factor estacional parecería ser la demanda en el periodo dividida entre el término constante. Sin embargo, debe corregirse por la parte de tendencia de la constante.

La estimación para la porción constante, S_T, se calculó de manera que reflejara el proceso en el tiempo *T*. Intuitivamente, la porción constante del proceso en *T* - ldebe ser más pequeño en B_T , y más pequeño en $2B_T$ en *T - 2*. En general, una estimación de la porción constante del proceso para el periodo *t (t < T)* es la estimación de la constante en el tiempo *T* menos la estimación de la tendencia multiplicada por el número de periodos, esto es, S_T - B_T x *(T - t)*. Una vez hecho el ajuste por tendencia, se puede dividir la demanda real entre este valor ajustado, para obtener una estimación del factor estacional. Se calculan los factores estaicionales usando la fórmula

$$C_t = \frac{d_t}{S_T - B_T(T - t)}$$

donde C, es la estimación de c_t. Se promedian los factores estacionales para la misma estación de cada año para eliminar el ruido.

Estos factores estacionales, sin embargo, no necesariamente suman *L*. Para normalizarlos primero se determina *R*, el cociente de la duración de la estación entre la suma de los factores estacionales:

$$R = L \Big/ \sum_{t = T - L + 1}^{T} C_t$$

$$C'_t = R \times C_t \qquad t = T - L + 1, T - L + 2, \ldots, T$$

El número de nuevos factores siempre es el mismo que los periodos en la estación.

Ejemplo 4-5. Factores estacionales iniciales. Calcule los factores estacionales iniciales para los datos de la tabla 4-11.

Solución. Para calcular una estimación del factor estacional para el periodo 1 en el ejemplp, se divide $d_{\{}$ entre el término constante para el periodo 1. El término constante ajustado será

$$S_T - B_T \times (12 - 1) = 176.83 - 5.5 \times 11 = 116.33$$

Se divide d_x = 60 entre 116.33 y daC, = 0.52. Las ventas del primer trimestre son de alrededor de 52% del valor promedio. Después se calculan los factores estacionales para el primer trimestre de los años 2 y 3 y se hace C_9 igual al promedio de los tres. La tabla 4-12 muestra cálculos similares, efectuados en una hoja de cálculo, para el resto de los datos. La última columna normaliza los factores estacionales.

TABLA 4-12
Calculo de factores estacionales iniciales

	Año				
Trimestre	**1**	**2**	**3**	**Promedio**	**Normalización**
1 2	0.52	0.50	0.52	0.51	0.51
3 4	1.92	1.85	1.88	1.88	1.87
	1.28	1.26	1.26	1.25	1.25
	0.38	0.38	0.36	0.37	0.37
Suma				4.02	4.00

Conforme se dispone de nuevos datos, se pueden actualizar las estimaciones con suavizamiento exponencial. Las constantes para el término constante, la tendencia y los factores estacionales se denotan por α, β y γ, respectivamente. Dados S_{T-1}, B_{T-1} y C_{T-L+1}, $C_{T-L+2}, \ldots,$ C_{T-1}, cuando se conoce d_T se pueden determinar S_T, B_T y C_T. La estimación del término constante S_T será

$$S_T = \alpha\left(\frac{d_T}{C_{T-L}}\right) + (1-\alpha)(S_{T-1} + B_{T-1})$$

Para actualizar la estimación de la componente de tendencia, se usa la ecuación

$$B_T = \beta(S_T - S_{T-1}) + (1-\beta)B_{T-1}$$

Por último, los factores estacionales actualizados se estimarán con

$$C_T = \gamma\left(\frac{d_T}{S_T}\right) + (1-\gamma)C_{T-L}$$

El pronóstico para dentro de k periodos $(k \leq L)$ está dado por

$$F_{T+k} = (S_T + kB_T)C_{T+k-L}$$

Si se quiere pronosticar más de una temporada futura, es decir, $k > L$, entonces $T + k - L$ es mayor que T y la estimación específica del factor estacional no se conoce. En su lugar, se usa el valor más reciente calculado para el periodo correspondiente. Sea g el entero más pequeño mayor o igual que k/L; se calculó esa estimación estacional g estaciones antes. Entonces el factor estacional adecuado para usar en la ecuación del pronóstico es el calculado en el tiempo $T + k - gL$. Esta ecuación se convierte en

$$F_{T+k} = (S_T + kB_T)C_{T+k-gL}$$

Ejemplo 4-6. Pronósticos con el método de Winters. Si d_{13} es 97 y $\alpha = 0.15, \beta = 0.1$ y $\gamma = 0.2$, actualice los parámetros y pronostique los periodos 14 y 17.

Solución. Sea $S_{12} = 176.83$, $B_{12} = 5.5$, $C_9 = 0.51$, $C_{10} = 1.87$, $C_{11} = 1.25$ y $C_{12} = 0.37$. La nueva estimación para la constante es

$$S_{13} = \alpha\left(\frac{d_{13}}{C_9}\right) + (1-\alpha)S_{12} = 0.15\left(\frac{97}{0.51}\right) + 0.85 \times 176.83 = 178.83$$

Ahora se puede actualizar la componente de tendencia:

$$B_{13} = \beta(S_{13} - S_{12}) + (1-\beta)B_{12} = 0.1(178.83 - 176.83) + 0.9 \times 5.5 = 5.15$$

Por último, se puede calcular una nueva estimación estacional para el periodo 13, que es el primer periodo del año. Resulta

$$C_{13} = \gamma\left(\frac{d_{13}}{S_{13}}\right) + (1-\gamma)C_9 = 0.2\left(\frac{97}{178.83}\right) + 0.8 \times 0.51 = 0.516$$

Como al redondear C_{13} a 0.52 se obtiene un valor diferente, es necesario normalizar los factores estacionales. Los nuevos factores son 0.52, 1.86, 1.25 y 0.37.

Para hacer un pronóstico para el periodo 14 se tendría

$$F_{14} = (S_{13} + 1 \times B_{13})C_{10} = (178.83 + 5.15)1.86 \approx 342.21$$

De manera similar, el pronóstico para el periodo 17 sería

$$F_{17} = (S_{13} + 4 \times B_{13})C_{13} = (178.83 + 4 \times 5.15)0.52 \approx 103.71$$

En ambos casos se usó el factor estacional para el periodo correspondiente de la estación anterior. Si se quiere pronosticar el periodo 20($k = 7$), el entero más pequeño mayor que 7/4 es 2, de manera que se usaría el factor estacional para el periodo $13 + 7 - 2 \times 4 = 12$.

Ahora se hará un resumen de este procedimiento de pronósticos. Sea L la duración de la estación con m estaciones completas de datos disponibles. Se tienen $T = mL$ datos, $d_1, d_2, \ldots, d_T$.

Paso 1. Se calcula el promedio para cada una de los dos últimas estaciones de datos $\bar{d}_m$ y $\bar{d}_{m-1}$, a partir de la fórmula

$$\bar{d}_i = \frac{\sum_{t=(i-1)L+1}^{iL} d_t}{L} \qquad i = m-1, m$$

Ahora se calcula B_T

$$B_T = \frac{\bar{d}_m - \bar{d}_{m-1}}{L}$$

Paso 2. Se calcula el promedio global

$$\bar{D} = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} d_t$$

y se usa junto con B_T para calcular S_T, la estimación de la constante como

$$S_T = \bar{D} + \frac{T-1}{2}B_T$$

Paso 3. Se calculan los factores estacionales usando la ecuación

$$C_t = \frac{1}{m}\sum_{i=0}^{m-1} \frac{d_{t-iL}}{S_T - (T - [t - iL])B_T} \qquad t = T-L+1,\ T-L+2, \ldots, T$$

Paso 4. Para pronosticar k periodos futuros se usa

$$F_{T+k} = (S_T + kB_T)C_{T+k-gL}$$

donde g es el entero más pequeño mayor o igual que k/L.

Paso 5. Cuando se obtiene un nuevo dato, se hace $T = T + 1$ y se actualizan los parámetros del pronóstico.

$$S_T = \alpha\left(\frac{d_T}{C_{T-L}}\right) + (1-\alpha)(S_{T-1} + B_{T-1})$$

$$B_T = \beta(S_T - S_{T-1}) + (1-\beta)B_{T-1}$$

$$C_T = \gamma\left(\frac{d_T}{S_T}\right) + (1-\gamma)C_{T-L}$$

Se pueden usar otros modelos. Si no hay tendencia, se eliminan b y B_T de todos los cálculos. Una desventaja del modelo multiplicativo con tendencia es que la tendencia aumenta la amplitud del patrón estacional. Los modelos aditivos,

$$d_t = a + bt + c, + e,$$

no tienen esta limitación. La estimación de los parámetros y el pronóstico son muy similares a los modelos multiplicativos (vea, por ejemplo, Montgomery *et al*, 1990).

SECCIÓN 5 EJERCICIOS

4.24. Considere

Periodo	1	2	3	4	5	6
Demanda	107	93	106	98	100	96

Utilice los cinco primeros periodos para pronosticar el periodo 6 usando lo siguiente:

a) El último dato
b) El promedio
c) Un promedio móvil de tres periodos
d) Suavizamiento exponencial con a = 0.2
é) Con base en esta predicción, ¿qué método es mejor y por qué? *j)*
¿Cuál es el pronóstico para el periodo 10 usando cada método?

4.25. La demanda de un artículo se da en la tabla. Utilice suavizamiento exponencial con a = 0.15 y el hecho de que el pronóstico para el periodo 13 es 255.

t	d,	t	d,	t	d,	t	d,
1	239	4	345	7	227	10	352
2	325	5	254	8	221	11	241
3	268	6	216	9	208	12	420

a) Proporcione un pronóstico para los periodos 14 y 20.
b) ¿Cuál sería un promedio móvil "equivalente"?
c) ¿Parecería adecuado un promedio móvil simple para estos datos?

4.26. Se está usando el método de Holt (suavizamiento exponencial doble) para pronosticar la demanda mensual de un zapato deportivo, con a = 0.1 y P = 0.2. Las últimas estimaciones de la ordenada y la pendiente fueron 1067.2 y 21.6, respectivamente. La demanda de este mes es 1100.

a) Proporcione su pronóstico para el mes próximo.
b) Haga lo mismo para dentro de tres meses.

4.27. Heather Foods, Inc. hace botanas que se venden a supermercados. La siguiente tabla muestra las observaciones mensuales de las ventas de botanas de maíz durante 1992 y 1993 en miles de bol sas. Heather Foods ha vendido botanas de maíz durante 10 años, y el departamento de planeación maneja la demanda como un proceso constante. Determine el pronóstico para enero de 1994 usan do los siguientes métodos:

a) El último dato
b) Promedio de todos los datos

c) Promedio móvil con $N = 6$

d) Suponga que la demanda real en enero de 1994 es 55.2 miles de bolsas. Calcule el pronóstico para febrero usando la ecuación de actualización para el promedio móvil con $N = 6$\

Obs.	Mes	Demanda	Obs.	Mes	Demanda
1	Enero	48.5	13	Enero	48.9
2	Febrero	46.0	14	Febrero	49.5
3	Marzo	54.4	15	Marzo	59.0
4	Abril	49.8	16	Abril	56.0
5	Mayo	48.1	17	Mayo	49.3
6	Junio	55.0	18	Junio	58.5
7	Julio	47.7	19	Julio	53.0
8	Agosto	45.2	20	Agosto	48.6
9	Septiembre	51.0	21	Septiembre	50.8
10	Octubre	47.5	22	Octubre	53.4
11	Noviembre	49.1	23	Noviembre	49.8
12	Diciembre	50.8	24	Diciembre	56.3

4.28. Suponga que Heather Foods quiere comenzar un pronóstico usando suavizamiento exponencial simple con una edad del promedio ponderado de los datos igual a la de sus pronósticos coni prome dios móviles. Calcule el pronóstico para enero de 1994 usando el promedio global para $S_{23;}$. Calcu le el pronóstico para febrero de 1994 si la demanda de enero es 55.2 miles de bolsas.

4.29. La demanda de bicicletas para todos los terrenos ha aumentado en forma constante desde 1989. En la siguiente tabla se muestran las ventas por trimestre de las bicicletas de montaña producidas por Canyon and Cactus Cycles desde el segundo trimestre de 1989.

a) Grafique los datos y verifique que el modelo de tendencia lineal es aceptable. Trace una recta a través de los datos y obtenga una estimación visual de *a* y *b*.

b) Estime los parámetros del modelo en preparación para suavizamiento exponencial doble.

c) Pronostique las ventas para el tercer trimestre de 1996 usando estas estimaciones iniciales.

d) Pronostique las ventas para el cuarto trimestre de 1996 usando alfa = 0.3 y beta = 0.2J5, si las ventas en el tercer trimestre de 1996 fueron de 234.

é) Utilice regresión lineal para estimar los parámetros y pronosticar el tercer trimestre de 1996.

Obs.	Año	Trimestre	Demanda	Obs.	Año	Trimestre	Demanda
1	1989	**2**	16	16	1993	1	147
2		**3**	73	17		2	142
3		**4**	61	18		3	134
4	1990	**1**	57	19		4	159
5		**2**	43	20	1994	1	Í81
6		**3**	44	21		2	168
7		**4**	68	22		3	|68
8	1991	**1**	68	23		4	188
9		**2**	73	24	1995	1	186
10		**3**	84	25		2	189
11		**4**	93	26		3	184
12	1992	**1**	128	27		4	224
13		**2**	100	28	1996	1	207
14		**3**	130	29		2	223
15		**4**	148				

4.30. La corporación Compu Valu es un fabricante importante de computadoras y periféricos. Sus ventas (en millones de dólares) desde 1980 se dan en la tabla. Cuando las ventas excedan $60 millones debe construirse una nueva planta de producción. ¿Cuándo debe terminarse la nueva planta?

Año	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
Demanda	14.0	15.4	15.8	19.3	21.5	25.1	27.0	27.1	31.1
Año	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	
Demanda	33.9	34.9	36.2	39.3	44.8	45.3	46.8	48.3	

4.31. Los siguientes son datos del Bureau of Labor Statistics en miles de trabajadores que sufren traumas repetitivos. Proporcione un modelo para pronosticar 1996.

Año	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993
Número	22.6	26.7	34.7	37.0	45.5	72.9	115.3	146.9	185.4	223.6	281.8	302.0

4.32. Desarrolle las ecuaciones para estimar la ordenada y la pendiente de un modelo de tendencia mediante promedios móviles dobles. Aplíquelas a los datos del problema 4.29.

4.33. La corporación Killian fabrica mezcla para chocolate caliente. Las ventas, en miles de libras, siguen un patrón estacional. Los pronósticos trimestrales se obtienen usando suavizamiento exponencial para un modelo estacional sin tendencia. Actualmente S_4 = 186.5, q = 1.4, c, = 0.6, c_3 = 0.3 ye, = 1.7.

a) Dé los pronósticos para los siguientes cuatro trimestres.
b) La demanda del primer trimestre del nuevo año es 285. Actualice los parámetros y dé los pronósticos para los siguientes cuatro trimestres si a = 0.25 y Y = 0.15.

4.34. SafSeal moldea por inyección tapas de plástico herméticas para productos al consumidor. El moldeo funciona mejor a 68°. La planta está equipada con un horno de gas para clima frío y acondicionadores de aire para clima caliente. Por esta razón, el consumo de energía eléctrica es estacional con pico en los meses de verano y baja en los meses de invierno.

á) Utilice un modelo multiplicativo para estimar los parámetros.
b) Pronostique el consumo de energía eléctrica para cada trimestre de 1996.

Obs.	**Año**	**Estación**	**Demanda**	**Obs.**	**Año**	**Estación**	**Demanda**
1	1992	Invierno	1752	9	1994	Invierno	1783
2		Primavera	3341	10		Primavera	2324
3		Verano	4910	11		Verano	4377
4		Otoño	3704	12		Otoño	4042
5	1993	Invierno	1738	13	1995	Invierno	1741
6		Primavera	2037	14		Primavera	2712
7		Verano	4444	15		Verano	4972
8		Otoño	3308	16		Otoño	3839

4.35. Sue es una nueva empleada del centro de distribución del sureste de Rash, Inc. Ella piensa que se necesita un mejor programa de seguridad y ha recolectado datos de los accidentes por trimestre. Proporcione a Sue un pronóstico por trimestre para el próximo año, y justifique su modelo y los números para que Sue pueda presentar de manera efectiva su propuesta a la administración.

	Accidentes			
Trimestre	1	2	3	4
Año 1	42	58	74	44
Año 2	48	70	95	50

4.36. Lily Pads, Inc. fabrica accesorios para natación y deportes acuáticos para niños. En 1992 introdujeron sus gogles EZ-Glide y las ventas durante los meses de verano han aumentado de matíera estable desde el verano de 1992.

Obs.	Año	Estación	Demanda
1	1992	Primavera	23
2		Verano	51
3		Otoño	12
4	1993	Invierno	7
5		Primavera	30
6		Verano	67
7		Otoño	18
8	1994	Invierno	14
9		Primavera	37
10		Verano	81
11		Otoño	21
12	1995	Invierno	12

a) Grafique los datos y observe la estacionalidad. Grafique los datos de cada año por separado y observe la tendencia de crecimiento.

b) Estime S_T, B_T y los factores estacionales.

c) Pronostique las ventas para la primavera y el verano de 1995.

4.37. Si los datos de ventas de Lily Pad para 1995/1996 son los que se muestran, pronostique la ventas para el verano de 1996 y el invierno de 1997.

Trimestre	Demanda	Trimestre	Demanda
Primavera 1995	46	Otoño 1995	24
Verano 1995	99	Invierno 1996	13

4.38. SnugFit es una compañía que fabrica botas de esquiar con materiales compuestos. La$ botas tuvieron ventas lentas al introducirlas al mercado, pero los esquiadores han reconocido qye son excelentes y el precio es sólo alrededor del 15% más alto que otras marcas. El departamento de pegado hace las uniones en las botas y el año pasado tenía 25 empleados. La eficiencia ppr trabajador fue 83% el otoño pasado. Tres de estos trabajadores renunciaron. Dados los datos d^ demanda de los últimos cuatro años, ¿cuántos trabajadores recomendaría contratar para el próximo invierno? ¿Recomendaría un número distinto para la primavera, verano y otoño del próximo año?

	Demanda (cajas)			
Trimestre	Añol	Año 2	Año 3	Año 4
Invierno	156	167	179	188
Primavera	23	29	46	56
Verano	49	38	69	91
Otoño	220	247	238	248

4.39. Bradley & Hiller producen bates de madera que se usan principalmente en el béisbol profesional. El departamento de compras quiere firmar un contrato a largo plazo con el proveedor de barniz. Este contrato especificaría la cantidad (en miles de galones) de barniz que B&H compraría cada trimestre de los próximos dos años. Las entregas reales se harían semanalmente, pero el total del trimestre debe ser muy cercano a las cifras contratadas. La tabla muestra el uso de barniz (en miles de galones) para los tres años anteriores. Aconseje a compras respecto a la cantidad de bamiz que debe contratar cada trimestre de los próximos dos años.

Año	Trimestre	Galones	Año	Trimestre	Galones	Año	Trimestre	Galones
1	1	432	2	1	409	3	1	425
	2	323		2	406		2	343
	3	135		3	168		3	182
	4	2		4	38		4	8

6. OTROS MÉTODOS DE PRONÓSTICOS

Muchos otros métodos de pronóstico han probado ser útiles y, aunque el alcance de este libro no permite estudiarlos todos, se introducen algunos de ellos. Los detalles se pueden encontrar en las referencias.

6.1 Método del pronóstico central

El pronóstico central, según lo define Smith (1978), está basado en dos ideas fundamentales. Una es que las personas prefieren métodos sencillos que puedan entender, la otra es que es muy probable que lo que últimamente ha funcionado bien siga haciéndolo ahora. Una manera de combinar estas dos ideas es usar varios métodos sencillos para generar un pronóstico y usar el que dé los mejores resultados para el periodo anterior.

Con frecuencia, los métodos de pronóstico que se usan son muy intuitivos. Algunos ejemplos de generación de pronósticos serían, la demanda del último periodo, la demanda del mismo periodo del año anterior, 90% de la demanda del último periodo, la demanda promedio de los últimos tres periodos, suavizamiento exponencial simple o nada más la estimación del gerente. No es difícil diseñar muchos otros métodos de este tipo.

El pronóstico que se usa al final es el pronóstico del método que dio el mejor resultado el periodo anterior. Existen varias maneras de definir "el mejor". Una forma sencilla es calcular el valor absoluto de la diferencia entre el pronóstico y la demanda real del último periodo. El procedimiento de pronóstico con la menor diferencia gana, y su pronóstico se usa para el siguiente periodo. Por supuesto, el siguiente periodo puede tener un nuevo ganador, según el desempeño de los métodos de pronóstico en este nuevo periodo.

Ejemplo 4-7. Pronóstico central. Utilice el pronóstico central para determinar el mejor pronóstico para el dentífrico en el periodo 51 usando los datos de la tabla 4-7.

Solución. Suponga que se usan cinco métodos de pronóstico: la demanda del último periodo, 90% de la demanda del último periodo, 110% de la demanda del último periodo, un promedio móvil de tres periodos y suavizamiento exponencial simple. Estos pronósticos para el periodo 50 aparecen en la tabla 4-13, junto con la demanda real de ese periodo y el valor absoluto de la diferencia del pronos-

TABLA 4-13
Ejemplo de pronóstico central

Método	F_{50}	d_{50}	$\lvert F_{50} - d_{50} \rvert$
Último dato	52.0	58	6.0
90% del último dato	46.8	58	11.2
110% del último dato	57.2	58	0.8
Prom. móvil $N = 3$	47.3	58	10.7
S. Exp.	49.8	58	8.2

tico y la demanda para cada método. Como 110% de la última demanda habría dado el pronóstico con el menor error, se usa para pronosticar el periodo 51. Esto es

$$F_{51} = 1.1 \times 58 = 63.8 \approx 64$$

Otra forma de implantar este tipo de enfoque es promediar todos los pronósticos para obte ner uno solo. Usando este enfoque con el ejemplo anterior se obtiene un pronóstico de 50.6 pa ra el periodo 51, lo cual sería mejor para este periodo que el pronóstico central.

El concepto básico del pronóstico central es usar varios métodos simples. Newbold y Granger (1974) refuerzan el concepto demostrando que con frecuencia se logran mejores pronósticos usando varias técnicas. Armstrong (1984) proporciona una mayor justificador! citando la literatura que indica que las técnicas sencillas de pronósticos, en la práctica, muchas veces dan mejores pronósticos que los métodos complicados.

6.2 Métodos cualitativos

Existen varios métodos cualitativos que no se analizaron, incluyendo la descripción d$l escenario y el análisis de impacto cruzado. A continuación se da un breve comentario de cadi uno.

La **descripción del escenario** se usa para hacer un retrato de cómo evolucionará el presente con el tiempo, en lugar de obtener un número; con frecuencia se usa junto con el método Delphi. La descripción del escenario comienza tratando de identificar un conjunto de eventos futuros posibles. Se escribe un conjunto de escenarios, cada uno basado en un evento! futuro posible. Cada escenario se examina con cuidado para determinar su probabilidad de ocurrencia, y se desarrollan planes de contingencia para los más probables. La descripción de escenarios es más adecuada para el largo plazo, para las macrosituaciones tipificadas por la incertidumbre, para la falta de datos y para los factores no cuantificables. Es útil en especial para estimar la demanda futura, la innovación tecnológica o la posición de mercado bajo una variedad de condiciones económicas y políticas. Barron y Targett (1985), Huss (1988) y Schnaars (1987) proporcionan más detalles sobre la descripción de escenarios.

Georgia Power usó escenarios para determinar un plan de expansión de su capacidad de generación de energía (Goldfarb y Huss, 1988). El estudio identificó 14 factores importantes que influyen en el consumo de energía: crecimiento del PNB; aumento de la productividad; tasas de los bonos T; población; cociente de manufactura entre empleos de servicios; uso industrial de electricidad; precio promedio de electricidad; políticas federales de energía; reglamento sobre lluvia acida; opciones de energía nuclear; precios del petróleo; precios de gasolina, gas y carbón, y el rendimiento neto de inversiones comunes. Se desarrollaron tres escenarios, crecimiento económico alto, moderado y bajo. Se determinaron valores probables para cada fac-

tor bajo condiciones económicas supuestas y se desarrolló un plan de expansión para cada escenario. Los escenarios facilitaron una mayor participación de la administración, integraron las funciones de planeación separadas dentro de la compañía y proporcionaron un foro de discusión sobre las opciones críticas de planeación a la luz de la opinión de los expertos.

Una compañía americana utilizó escenarios para pronosticar la demanda de tecnología de la información en Europa (Millet, 1992) y los expertos en el área identificaron 20 factores críticos. La evaluación de estos factores condujo a cuatro escenarios y, después de revisarlos, la administración de la compañía llevó a cabo varias acciones, entre ellas establecer un compromiso para mantener y expandir su oficina de Bruselas.

Un **análisis de impactos cruzado*** con frecuencia se usa para examinar los resultados de un estudio Delphi. El análisis de impactos cruzados indica los escenarios que deben describirse. Este procedimiento es de panorama amplio, igual que la descripción de escenarios, y evalúa la probabilidad de ocurrencia de ciertos eventos futuros que pueden interactuar y afectar las decisiones futuras.

El primer paso es determinar los eventos críticos relacionados con el tema de interés, que se resumen a un número manejable. Se forma una matriz en la que cada renglón representa algún evento; las columnas representan los mismos eventos que el renglón correspondiente. Al principio, se escribe en la matriz la naturaleza de la interacción entre cada evento o factor. Una flecha hacia arriba indica una influencia positiva y una flecha hacia abajo indica una influencia negativa. Se estiman la probabilidad de cada evento y las probabilidades de que ocurran dos eventos simultáneos, y se convierten en los elementos de la matriz.

Ejemplo 4-8. Análisis de impactos cruzados. Una compañía que produce celdas solares para convertir la energía solar en electricidad puede comprar un nuevo proceso de producción, que sólo será económico si la demanda aumenta por lo menos 30% en los próximos tres años. ¿Cómo deben tomar esta decisión?

Solución. Los pronósticos de series de tiempo pueden no dar una buena indicación del incremento, ya que los avances tecnológicos, la reglamentación gubernamental y los factores económicos pueden cambiar el panorama por completo; por otro lado, el análisis de impactos cruzados es un método adecuado. Para simplificar, sólo se considerarán tres eventos: un motor eléctrico más eficiente (MME), crédito de impuestos del gobierno en energía solar por su preocupación por el medio ambiente (CIG) y mayores costos de los combustibles alternativos (MCC).

	MME	CIG	MCC
MME	—	⇓	⇓
CIG	⇑	—	⇑
MCC	⇑	—	—

Si se construye un mejor motor, la demanda del combustible alternativo será menor, lo que bajará su costo. La reducción en el uso de combustible fósil ayudará al ambiente, disminuyendo la posibilidad de que el gobierno ofrezca créditos sobre impuestos para la energía solar. Se determinan otros tipos de influencia para completar esa parte de la matriz de impacto cruzado.

La probabilidad de que se desarrolle un motor más eficiente se estima en 0.2. Si el gobierno instituye créditos de impuestos solares, más investigadores trabajarán en este tipo de motor y la probabilidad aumentará a 0.3. Un aumento en el costo de combustibles alternativos estimulará esta investigación y dará una probabilidad de 0.4 de que se desarrolle un motor más eficiente. El resto de las probabilidades en la matriz se determinan de manera similar.

	Prob.	MME	CIG	MCC
MME	.2	—	.2	.6
CIG	.3	.3	—	.7
MCC	.8	.4	—	—

La matriz puede simularse para explorar los distintos resultados. Si se usan otras probabilidades se puede determinar la sensibilidad del resultado respecto a la evaluación de las probabilidades. Los factores no sensibles se pueden eliminar y se pone mayor atención a la estimación de Ja probabilidad de los factores sensibles. Se pueden describir los escenarios para los resultados mási probables y formularse planes de contingencia.

El análisis de impactos cruzados se ha usado en la industria automotriz europea (Vickers, 1992), en el mercado de tecnología de la información europeo (Miller, 1992), en la demanda de energía eléctrica (Goldfarb y Huss, 1988) y en reglamentación de protección ambiental (Beasley, 1984). Schuler *et al.* (1991) presentan un estudio típico de impacto cruzado. Laj industria maderera canadiense se enfrentó a un decremento en la calidad de la madera y se temia que las ventas bajaran. Varias innovaciones en el proceso y en el producto podrían ayudar a¡ aliviar el problema, por lo que se desarrolló una matriz de impactos cruzados que incluía factores de innovación, reglamentación del gobierno y posibles acciones de los competidores. Se llevaron a cabo las estrategias de inversión tecnológica y las comparaciones para los seis escenarios resultantes. Una estrategia mixta de inversión en tecnología para el proceso y el producto se identificó como la mejor para mantener e incrementar la demanda.

6.3 Métodos causales

Los modelos de regresión se usan ampliamente en el pronóstico causal. Otros métodos son específicos para ciertos problemas e incluyen sistemas de ecuaciones simultáneas y de sistemas de simulación.

Los **sistemas simultáneos** son parecidos a los métodos de regresión, pero en lugar de una sola ecuación se componen de varias ecuaciones simultáneas. Los modelos econcimétricos, usados para pronosticar y explicar fenómenos económicos complicados, son sistemáis simultáneos. Los modelos de regresión tienen una variable dependiente, que es una función de una o más variables independientes. Las variables independientes son exógenas al modelo; sus valores se conocen a partir de otra información. Los sistemas simultáneos normalmente tienen varias ecuaciones y una variable dependiente en una ecuación puede ser una variable independiente en otra. Así, las variables son interdependientes.

Como ejemplo, suponga que se quieren pronosticar ventas. Muchos factores determinan las ventas, incluyendo el estado de la economía, el precio, la disponibilidad y la calidad del artículo y la publicidad. Se puede proponer una relación usando la demanda como variable dependiente y los otros factores como variables independientes. Sin embargo, las variables independientes pueden afectarse entre ellas. Por ejemplo, el precio está relacionado con el costo y éste puede estar relacionado con las cantidades producidas. Una demanda alta puede reducir el costo a través de economías de escala, reduciendo el precio y creando una demanda aún más alta. El modelo puede consistir en varias ecuaciones que relacionan variables y las ecuaciones pueden o no ser lineales.

Para construir un sistema de pronósticos a partir de las ecuaciones simultáneas, se debe decidir qué variables son importantes y determinar la forma del modelo. La estimación de parámetros ya no es un problema de regresión. Si las ecuaciones se pueden manipular de manera que una variable sea una función de las variables exógenas independientes, se puede aplicar regresión a esa ecuación. Una vez expresada la variable independiente en términos de las variables exógenas, se puede sustituir en otra ecuación y repetir el procedimiento. Si tales sustituciones no son posibles, todos los parámetros se tienen que estimar al mismo tiempo. Algunas veces, se eligen las estimaciones iniciales, y se hacen varias iteraciones de mínimos cuadrados hasta que las estimaciones no cambien.

Existen muchas aplicaciones de sistemas simultáneos usados para pronósticos; por ejemplo, Goss (1990) desarrolló un modelo de ecuaciones simultáneas del mercado de lana australiano. El modelo contiene relaciones funcionales para los inventarios, el consumo y las actividades de los especuladores con acciones y precios de la lana. Los coeficientes se estiman usando mínimos cuadrados en tres etapas con corrección por correlación serial de primer orden. El modelo proporciona buenos pronósticos internos y *a posteriori* de la mayor parte de las variables. Un modelo dinámico de ecuaciones simultáneas para predecir balances da un mejor pronóstico que los modelos ARIMA (Lin, 1992). Otro ejemplo incluye un macromodelo de la economía de Italia, que usa un sistema no lineal de ecuaciones simultáneas (Calzolari y Panattoni, 1990) y un modelo de ecuaciones simultáneas para predecir los precios del mercado de valores de Japón , Estados Unidos y Gran Bretaña, que incorpora la interacción de los rendimientos entre mercados (Koch y Koch, 1994).

La mayor ventaja de los sistemas de ecuaciones simultáneas es que el nivel de detalle está controlado. Si se necesita incluir muchos factores, puede hacerse. Si existen interdependencias, este enfoque es necesario. Igual que con muchos esfuerzos de modelado, el desarrollo de modelos produce una visión completa del fenómeno. Desafortunadamente, estos modelos son un reto en el sentido técnico, tanto en la construcción como en la solución. Pueden ser computacionalmente caros, y los costos de recolección de datos pueden también ser altos. Puede encontrar más detalles de este procedimiento en Fildes (1985), Levenbach y Cleary (1984) o en Makridakis y Wheelwright (1978).

Los **métodos de simulación** imitan el comportamiento de un sistema. Estos modelos se basan en una gran variedad de relaciones y por lo general consideran elementos estocásticos del problema. Lo mismo que las ecuaciones en los sistemas simultáneos, las interrelaciones en un modelo de simulación son altamente dependientes del sistema bajo estudio. Casi siempre, estos enfoques requieren mucho detalle y, por ende, son costosos. Estos métodos se pueden usar cuando es posible determinar las "causas" y se puede construir un modelo adecuado. Toedter (1992) usa simulación para estimar los coeficientes de un gran sistema no lineal interdependiente y obtener pronósticos para el Bundesbank. Considera la incertidumbre debida a residuales, a estimaciones de coeficientes y a pronósticos de variables exógenas. Los resultados empíricos sugieren que la simulación es superior a los pronósticos obtenidos a partir de sistemas simultáneos determinísticos.

6.4 Métodos de series de tiempo

Existen tres métodos de series de tiempo adicionales que merecen mencionarse: promedios móviles integrados autorregresivos (ARIMA), los métodos bayesianos y las redes neuronales. Se dará una breve descripción.

Los **métodos de promedios móviles integrados autorregresivos (ARIMA)** relajan la suposición de independencia de las observaciones sucesivas en la serie de tiempo, (pon frecuencia, esta suposición no se puede garantizar debido a que las observaciones sucesivas pueden ser altamente dependientes. Aunque el suavizamiento exponencial y los promedias móviles pueden ser adecuados cuando las observaciones son dependientes, los métodos que explotan este hecho deben proporcionar un mejor pronóstico. El método ARIMA másj conocido es el de Box-Jenkins, que recibe este nombre en honor de quienes lo propusieron y desarrollaron.

Los métodos ARIMA se pueden ver como una combinación de promedios móviles o suavizamiento y regresión. El pronóstico se basa en una función de datos históricos ponderados, que permite un rango más amplio de patrones para pronosticar. Un modelo de Box-Jenkins es el modelo autorregresivo del Pésimo término. Matemáticamente es

$$x_t = a_0 + a_1 x_{t-1} + a_2 x_{t-2} + \cdots + a_k x_{t-k} + \varepsilon_t$$

Cada observación depende de un término constante a_0, k observaciones anteriores y la componente de ruido. Las estimaciones de los parámetros a_0, a_x,..., a_k se pueden obtener mediante mínimos cuadrados u otras técnicas. La elección de k depende de la serie de tiempo que se quiere pronosticar. Existen muchos otros modelos para series de tiempo autorregresivas.

Para obtener buenos resultados, debe disponerse de un gran número de observaciones (más de 50). Para determinar un modelo adecuado se requiere juicio, prueba y error y análisis estadístico, lo cual hace poco atractivos estos métodos si se tiene que trabajar con muchas series de tiempo. Sin embargo, si existe autocorrelación entre las observaciones, estd enfoque puede ser el mejor.

Madsen (1991) quiso explicar cómo afecta el riesgo las expectativas de producción en la industria de la manufactura y, por ende, el comportamiento del abastecimiento. Modeló el proceso usando los indicadores líder de producción en un modelo de promedio móvil integrado autorregresivo (ARIMA) para pronosticar la producción. Usó en el modelo datos de industrias manufactureras de nueve países. Se han aplicado otros modelos ARIMA para predecir ganancias (Jarrett, 1990), servicios telefónicos especiales (Grambsch y Stahel, 1990), incremento en los afiliados al sindicato de trabajadores canadienses (Lin *et al.*, 1992), consumo semanal de electricidad (Ringwood *et al.*, 1993) y el precio de tierras para el cultivo (Tegene ylKuchler, 1994).

Los métodos ARIMA detallados se pueden encontrar en el libro de Box y Jenkins (1976). También cubren este material muchos textos sobre pronósticos, como Montgomery *et al.* (1990), Levenbach y Cleary (1984) y Makridakis y Wheelwright (1978).

Los **métodos bayesianos** son útiles en especial cuando se dispone de pocos datos. Inicialmente, se hace una estimación subjetiva de los parámetros y conforme se dispone de más datos se usa el teorema de Bayes para actualizar esas estimaciones. Bradford y Sugrue (1990) presentan un modelo para pronosticar la demanda de bienes de moda para una empresa que almacena cientos de artículos distintos —pinturas sin enmarcar que carecen de demanda histórica y con patrones de demanda que puedan cambiar con rapidez—. Después de los pronósticos iniciales, el modelo revisa los pronósticos con el procedimiento de Bayes en un esquema agregado por artículo. Las predicciones revisadas de las demandas, las ganancias estacionales y los niveles de servicio estuvieron, en promedio, entre 1 y 5% de los valores comparables obtenidos usando datos empíricos del caso de estudio. Otras aplicaciones de los métodos bayesianos incluyen pronósticos del tráfico en redes de computadoras (Greis y Gilstein, 1991), reclamación de cu-

pones (Lenk, 1992) e ingresos a partir de impuestos para las escuelas de distrito (Duncan *et al.*, 1993). Montgomery, Johnson y Gardiner (1990) presentan con detalle algunos métodos de pronósticos bayesianos.

Recientemente las **redes neuronales** han tenido impacto en los pronósticos (Belt, 1993; Papalexopoulos *et al.*, 1994; Sharda, 1994). Se puede encontrar información básica sobre redes neuronales en Chester (1993) o Fausett (1994). Una red neuronal imita la estructura y la función del cerebro. Representa implícitamente el conocimiento dentro de su estructura y aplica el razonamiento inductivo para procesar el conocimiento. Una red neuronal artificial es un conjunto de pequeñas unidades de procesamiento (neuronas) ligadas por conexiones dirigidas ponderadas (una red). Cada neurona recibe señales de entrada ya sea de una fuente de entrada o de otras neuronas. La señal se pondera según la conexión por la que pasa. Si el peso total de todas las señales de entrada es suficientemente fuerte, la neurona responde mandando una señal por cada una de sus conexiones de salida a otras neuronas.

Una red neuronal debe ser "capacitada". Al introducir a la red distintos conjuntos de datos de entrada junto con las salidas correspondientes, la red puede asociar una salida con ciertas características de la entrada. La forma exacta de las asociaciones es desconocida. Cuando se da una nueva entrada, la red pronostica una salida basada en las asociaciones que ha "aprendido". Se proporcionan salidas a la red una vez conocidos los hechos para que pueda seguir aprendiendo. El aprendizaje permite a las redes neuronales adaptarse e inferir soluciones a partir de los datos presentados, con frecuencia capturan relaciones sutiles. Además, pueden generalizar procesando correctamente datos que apenas se parecen a los datos sobre los que fueron capacitadas en un principio. Pueden también manejar datos incompletos o imperfectos, proporcionando una medida de tolerancia de la falla.

Como una red neuronal aprende directamente de los datos, puede realizar clasificaciones, pronósticos, compresión de datos y otras tareas similares. Se han publicado numerosas aplicaciones a pronósticos, que incluyen ventas, precios de acciones, resultados de procesos de molienda, bajas en la banca y requerimientos de energía eléctrica. Una red neuronal puede también seleccionar el método de pronósticos adecuado. Chu y Widjaja (1994) desarrollaron una red neuronal que elegía el modelo correcto para los datos de series de tiempo el 90% de las veces y el método de suavizamiento correcto el 70% del tiempo.

Sin embargo, las redes neuronales tienen limitaciones; las matemáticas no son sencillas y puede desconfiarse de ellas. Como "hay un solo tamaño" no son muy cuidadosas y pueden recibir influencia de información irrelevante. Una validación importante del modelo era determinar una razón fundamental para el modelo, por ejemplo, las ventas de refrescos son estacionales porque éstos refrescan cuando hace calor. Como las redes neuronales no establecen explícitamente la forma del modelo, se carece de esta validación. Por último, las técnicas estadísticas pueden proporcionar medidas de exactitud como intervalos de confianza que no están disponibles en las redes neuronales. Aun así, parecen viables y están disponibles, incluso como agregados a una hoja de cálculo.

7 CONTROL DEL PRONÓSTICO

El sistema de pronósticos necesita retroalimentación para asegurar los mejores resultados. El control del pronóstico es parte del proceso de retroalimentación (vea la figura 4-3). Intenta determinar si el pronóstico se desvía de los resultados reales debido a la aleatoriedad o a un cambio esencial en el proceso. Las variaciones aleatorias deben ignorarse, pero las no aleatorias

exigen cambios en los parámetros del modelo o incluso en el modelo mismo. Los conceptos presentados en esta sección se pueden usar para controlar cualquier sistema de pronósticos que produzca un pronóstico numérico, aun aquellos basados en técnicas cualitativas de pronósticos.

El error del pronóstico es la base para el control. Primero se determina el error del pronóstico y su variancia. Después se usa la variancia para hacer afirmaciones probabilísticas* como que el error debe exceder cierto valor sólo una vez cada 20. Estas afirmaciones se usan p^ra determinar si el desempeño del sistema es el esperado; si no cumple con las expectativas hay que corregirlo.

7.1 Error del pronóstico

El error del pronóstico es la diferencia entre la demanda real y el pronóstico. Matemáticamente, se tiene

$$e_t = d_t - F_t$$

Recuerde que F_t es un pronóstico para el periodo T calculado en un periodo anterior. Para simplificar la notación se supondrá que se calcula en el periodo anterior. Hay ocasiones en las que puede no quererse definir el error basado en el pronóstico calculado en el periodo anterior. Por ejemplo, suponga que se pronostica cada mes con un horizonte de tres meses y se usa el pronóstico para determinar los niveles de empleados y para planear la producción real. Las decisiones sobre tuerza de trabajo normalmente se toman varios meses antes, de manera que los empleados para junio se determinan, con el pronóstico, desde marzo. No se puede calcular el error hasta saber la demanda real de junio, tiempo en el cual se tienen pronósticos para junio obtenidos en marzo, abril y mayo. Como el pronóstico de marzo se usa para la decisión sobre la tuerza de trabajo de junio, debe también usarse para calcular el error al determinar la tuerza de trabajo, aunque se tengan pronósticos más recientes para el mismo periodo. Esto es, para evaluar el desempeño del pronóstico en cuanto al nivel de empleados, se calcula el error para junio restando el pronóstico para junio hecho en marzo de la demanda real de junio. Por otro lado, es posible que la decisión de producción se tome a partir del pronóstico de mayo, de manera que al evaluar el pronóstico, debe usarse el más reciente para calcular el error.

No se puede esperar pronosticar de manera exacta; las componentes aleatoria y de ruido del proceso aseguran que ocurrirá un error. Recuerde que el modelo supone que el ruido sigue una distribución normal, por lo que e_t puede ser positivo (subestimación de la demandja) o negativo (sobreestimación). Si el ruido es la única causa de error, es igualmente probable que sea positivo o negativo.

Al observar el error en un periodo aislado no se obtiene información útil. Los errores se observan en toda la historia del sistema de pronósticos. Existen varios métodos para este proceso, y cada uno tiene un significado distinto.

Defina la **suma de los errores de pronóstico** como

$$E_T = \sum_{t=1}^{T} e_t$$

Como se supone que el proceso tiene una componente aleatoria e, que sigue una distribución normal con media cero y variancia CT_E^2, entonces E_T debe ser cercano a cero si el pronostico se comporta apropiadamente. Es decir, algunas veces sobreestima y otras subestima, pera a la larga éstas se cancelan.

La tabla 4-14 ilustra varias funciones de error. Para cada periodo, la primera columna contiene la demanda real en el periodo. S_t (columna 2) es una estimación de suavizamiento exponencial (a = 0.2) de la demanda calculada en el periodo t. El procedimiento se inició con una <S_0 de 100. El error para el periodo t (columna 3) es la demanda menos el pronóstico para ese periodo. Se supondrá que se pronostica un periodo hacia adelante, de manera que

$$e_t = d_t - S_{t-1}$$

La suma de los errores E_t (columna 4) fluctúa, pero no se hace muy grande en ninguna de las direcciones, positiva o negativa.

Si E_t se aleja consistentemente de cero, entonces se dice que el pronóstico está sesgado; está equivocado de una forma específica y consistente. Un pronóstico que siempre es mayor que lo real se llama sesgado alto, mientras que un pronóstico que siempre es menor se llama sesgado bajo. Cuando ocurre un sesgo, lo más seguro es que el sistema de pronósticos tenga problemas. Suponga que E_t crece. Si aumenta a una tasa aproximadamente constante, cada pronóstico subestima la demanda en una cantidad constante, aproximadamente, lo cual ocurrirá si el valor de la porción constante del proceso está corrida. Al sumar esta cantidad al pronóstico se corrige el sesgo y se obtiene un pronóstico razonable.

Si E_t aumenta a una tasa que crece, es posible que se esté usando el modelo equivocado. Tal vez no se eligió el modelo correcto para el proceso o bien el proceso ha cambiado. Por ejemplo, el proceso puedo haber sido constante, pero ahora el producto ha madurado, un nuevo competidor ha ganado las ventas y ahora tiene una tendencia decreciente. El error se hará más grande en cada pronóstico sucesivo y E_t aumentará a un tasa creciente. Si E_t no se mueva alrededor de cero, deben buscarse las razones por las que el proceso pudo haber cambiado.

Aun cuando E_t sea cero, no se garantiza un buen sistema de pronósticos. Por ejemplo, si el error es +10 en periodos impares y-10 en periodos pares, los errores se cancelan y E_t es cero

TABLA 4-14
Algunas medidas de error

	1	2	3	4	5	6	7
t	d_t	S_t	$e_t = d_t - S_{t-1}$	E_t	DAM	ECM	PAME
1	105	101	5	5	5.00	25.00	4.76
2	97	100	−4	1	4.50	20.50	4.44
3	107	101	7	8	5.33	30.00	5.14
4	109	102	8	16	6.00	38.50	5.69
5	83	98	−19	−3	8.60	103.00	9.13
6	109	100	11	8	9.00	106.00	9.29
7	117	103	17	25	10.14	132.14	10.04
8	106	103	3	28	9.25	116.75	9.14
9	96	101	−7	21	9.00	109.22	8.93
10	103	101	2	23	8.30	98.70	8.23
11	99	100	−2	21	7.73	90.09	7.67
12	88	97	−12	9	8.08	94.58	8.17
13	103	98	6	15	7.92	90.08	7.99
14	91	96	−7	8	7.86	87.14	7.97
15	94	95	−2	6	7.47	81.60	7.58
16	90	94	−5	1	7.31	78.06	7.45
17	100	95	6	7	7.24	75.59	7.36
18	81	92	−14	−7	7.61	82.28	7.92
19	85	90	−7	−14	7.58	80.53	7.93
20	113	94	23	9	8.35	102.95	8.55

aunque es obvio que los pronósticos son malos. Para contrarrestar esto, se puede usar la **desviación absoluta media** (DAM). Se define como

aunque es obvio que los pronósticos son malos. Para contrarrestar esto, se puede usar la **desviación absoluta media** (DAM). Se define como

$$\text{DAM} = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}|e_t|$$

donde | e_t \ es el valor absoluto de e_t. DAM mide la dispersión de los errores y si DAM es pequeña, el pronóstico debe ser cercano a la demanda real. Los valores grandes de DAM pueden indicar problemas con el sistema de pronósticos. La columna 5 en la tabla 4-14 indica la DAM para los datos. De nuevo, como DAM es relativamente pequeña comparada con d_t, los pronósticos parecen razonables.

En ocasiones se usa una medida similar, el **error cuadrado medio,** ECM, definido como

$$\text{ECM} = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}e_t^2$$

Al elevar al cuadrado los términos de error aumenta la "penalización" para los errores grandes. Así, un solo error grande aumenta mucho el ECM. El ECM se presenta en la sexta columna de la tabla 4-14. Observe que el efecto de un error grande en el periodo 5 sobre el ECM sigue varios periodos.

Todas las medidas de demanda anteriores dependen de la magnitud de los números que se están pronosticando. Si los números son grandes, el error tiende a ser grande. Puede ser más significativo observar el error relativo a la magnitud de los pronósticos; esto se hace usando el **porcentaje absoluto medio del error**, PAME, donde

$$\text{PAME} = \frac{1}{T}\left(\sum_{t=1}^{T}\frac{|e_t|}{d_t}\times 100\right)$$

Si PAME es 10, entonces, los pronósticos se alejan 10% en promedio. Este proceso puede ser una forma más natural de medir el error. La última columna en la tabla 4-14 da el PAME para los datos. Es casi constante alrededor de 8%, de manera que los pronósticos dan confianza.

Ejemplo 4-9. Elección de un modelo con base en el error del pronóstico. Suponga que se quiere pronosticar sobre los datos de la tabla 4-14. ¿Qué modelo y qué parámetros son los mejores?

Solución. La información sobre el error se usa en muchos paquetes de computación para elegir un modelo y sus parámetros para un conjunto de datos. Se aplicó STORM a los datos de la tabla.4.14 y se usan los periodos 1 al 8 para ajustar distintos modelos. Los resultados son

Condiciones iniciales para series

Componente	Modelo de nivel	Modelo de tendencia	Modelo estacional	Modelo tend.-est.
Nivel	104.48	103.61	104.12	103,91
Tendencia	No disp.	-0.13	No disp.	-0.18
Estacional 1	No disp.	No disp.	0.82	0.82
Estacional 2	No disp.	No disp.	1.04	1.04
Estacional 3	No disp.	No disp.	1.12	1.12
Estacional 4	No disp.	No disp.	1.02	1.02
Suavizamiento	a= 0.3	ct=0.2,B=0.2	a= 0.1, y = 1.0	<x=0.1, p= 0.1,y =1.0

Entonces, el mejor modelo de nivel tiene S_s = 104.48 y usa a = 0.3. La constante no cambia significativamente de un modelo a otro, las componentes de tendencia son muy pequeñas, y dos de los cuatro factores estacionales son cercanos a 1, de manera que parece no haber una gran diferencia en estos modelos para el corto plazo.

Los valores de los pronósticos para los periodos 9 a 16 se obtienen de los cuatro modelos actualizando los parámetros con las constantes de suavizamiento dadas. Se registraron las siguientes medidas de error.

Estadísticas de error para ajuste de modelos

Estadística	**Modelo de nivel**	**Modelo de tendencia**	**Modelo estacional**	**Modelo de tendencia-estacional**
Error medio	-4.25	-3.12	-4.12	-3.25
% del error medio	-4.75	-3.53	-4.54	-3.60
Error medio absoluto	6.00	4.87	10.12	9.75
% del error medio abs.	6.45	5.23	10.63	10.23
Raíz de error cuadrado medio	6.96	5.99	11.50	11.22

A partir de estos resultados, STORM elige el modelo de tendencia porque tiene la menor raíz del error cuadrado medio. No parece haber una gran diferencia en ninguna de las medidas de error para cualquiera de los modelos.

Para una validación más del modelo, se pronostican los últimos cuatro periodos (17 a 20) y se actualizan con los resultados de los cuatro modelos. Se obtienen las siguientes medidas de error:

Estadísticas de error para validación de modelos

Estadística	**Modelo de nivel**	**Modelo de tendencia**	**Modelo estacional**	**Modelo de tendencia-estacional**
Error medio	2.25	4.50	1.25	2.25
% del error medio	0.42	2.87	-0.41	0.66
Error medio absoluto	12.75	12.50	11.25	10.75
% del error medio abs.	13.20	12.63	11.47	10.84
Raíz de error cuadado medio	14.77	15.00	14.08*	14.20

* El modelo estacional tuvo el mejor desempeño durante la validación.

Aquí el modelo estacional tuvo el mejor desempeño, pero las diferencias son pequeñas.

Si estuvieran presentes fuertes efectos de tendencia o estacionales, las diferencias de error habrían sido mucho más altas. Intentando mantener el modelo sencillo, se eligiría el modelo constante (de nivel). Al usar el modelo de tendencia se obtienen pronósticos de 92,91,91 y 90 para los siguientes cuatro trimestres, lo cual se acerca al modelo constante.

Una manera intuitiva de juzgar un método de pronósticos sería comparar su exactitud respecto a un método simple, como el último dato. Una comparación burda está dada por

$$U = \sqrt{\left[\sum_{t=2}^{T}\left(\frac{d_t - F_t}{d_t}\right)^2\right] \Big/ \left[\sum_{t=2}^{T}\left(\frac{d_t - d_{t-1}}{d_t}\right)^2\right]}$$

La suma del numerador es el error (real menos pronosticado) dividido entre la demanda real elevada al cuadrado; el cuadrado da más peso a los errores mayores. La suma del denominador

es la misma que la anterior, pero supone un pronóstico del último dato, es decir, F_t - *d,* _,. Este proceso es una variación de un método sugerido por Theil (1966).

Si *U* = 1, el pronóstico se desempeña tan bien como el pronóstico simple del último dato. Se espera que sea mejor, así que *U* debe ser menor que 1. Cuanto más pequeño sea *U,* mej or será el pronóstico respecto al último dato. Si *U* > 1, el pronóstico no es tan exacto como el último dato y no debe usarse.

Se obtuvo un pronóstico de los datos de la tabla 4.14 usando suavizamiento exponencial simple, así que en la fórmula se sustituye F_t por 5, _,. Se calcula *U* en el periodo *T* a partir de los cálculos de *U* del periodo anterior. Se necesitan las sumas del cuadrado del error relativo para suavizamiento exponencial y el último dato; éstas son 0.18 y 0.33, respectivamente, para el periodo 19. Cuando se conoce d_{2Q}, el nuevo valor de *U* es

$$U = \sqrt{\left[\sum_{t=2}^{T-1}\left(\frac{d_t - S_{t-1}}{d_t}\right)^2 + \left(\frac{d_T - S_{T-1}}{d_T}\right)^2\right] \Big/ \left[\sum_{t=2}^{T-1}\left(\frac{d_t - d_{t-1}}{d_t}\right)^2 + \left(\frac{d_T - d_{T-1}}{d_T}\right)^2\right]}$$

$$= \sqrt{\left[0.18 + \left(\frac{113-90}{113}\right)^2\right] \Big/ \left[0.33 + \left(\frac{113-85}{113}\right)^2\right]} = 0.75$$

De este cálculo, la suma del error relativo al cuadrado es {0.18 + $[(113 - 90) /113]^2$} = 0.22para suavizamiento exponencial y 0.39 para el último dato. Como *U* es menor que 1, el suavizamiento exponencial tiene mejor desempeño que el último dato.

La señal de seguimiento que se presenta en la siguiente sección es un método más formal para evaluar la exactitud de los pronósticos y qué tan apropiado es el método que sé usa.

Serial de seguimiento

El pronóstico es una estimación de una variable aleatoria. Se desearía examinar el valor del pronóstico y ver si la probabilidad de que ocurra es razonable. Recuerde que la probabilidad de una variable aleatoria JC se encuentra dentro de cierto intervalo, digamos [e, *u],* está dada por

$$\Pr\{\ell \le x \le u\} = p$$

En este caso interesa más encontrar t .i intervalo aceptable, por lo que se elegirá una probabilidad y se usará para determinar los límites adecuados, lo cual es similar a las cartas de control de calidad.

Para una distribución normal con media u y desviación estándar *a,* se sabe qué

$$\Pr\{\mu - K\sigma \le x \le \mu + K\sigma\} = p$$

Entonces, si el pronóstico excede estos límites, se tiene una certeza de (1 - *p)* de que no se debe al azar sino a una causa asignable, es decir, el error *no* es aleatorio. Se recomienda alguna acción correctiva como un cambio en los parámetros del modelo o el uso de un modelo diferente. Una señal de seguimiento es un método para verificar la aleatoriedad del error del pronóstico. Intuitivamente, la aleatoriedad de la señal de seguimiento debe estar relacionada con el ruido del proceso. Es decir, si no hubiera ruido y el modelo usado fuera un buen ajuste para el proceso real, el error del pronóstico debería ser cero. Si el ruido del proceso e tiene una distri-

bución normal con media cero y desviación estándar σ_ε, entonces e_t también tiene una distribución normal con media cero y desviación estándar σ_ε.

La señal de seguimiento se usará con base en E_t, el error acumulado, que es una buena manera de evaluar la naturaleza del error. Se necesita encontrar σ_ε, su desviación estándar. Bajo las suposiciones de normalidad, σ_ε es una función de σ_1 y en consecuencia de σ_ε y de los parámetros de la técnica de pronósticos que se está usando. Para suavizamiento exponencial simple, Brown (1963) demuestra que

$$\sigma_E \approx \sqrt{\frac{1}{2\alpha}}\,\sigma_\varepsilon$$

Dado que E_t es $N(0, o_E)$, se puede elegir una probabilidad p y determinar un intervalo

$$\Pr\{-K\sigma_E \leq E_t \leq K\sigma_E\} = p$$

Aunque no se conoce o_E, para una distribución normal la desviación absoluta media y la desviación estándar se relaciona (Brown, 1963) por

$$\text{DAM} = \sqrt{(2/\pi)}\,\sigma_\varepsilon$$

o bien, como la raíz cuadrada de2/π es alrededor de 0.8, DAM es aproximadamente *O.S* σ_E. Así,

$$\sigma_\varepsilon \approx \frac{\text{DAM}}{0.8}$$

Brown (1963) demostró que DAM/0.8 es una buena estimación de la desviación estándar aun para una distribución no normal. Su estudio empírico mostró que para distribuciones uniforme, exponencial o triangular, la constante sólo varía entre 0.74 y 0.86, por lo que 0.8 es de todas maneras una buena aproximación. Así, la normalidad de los errores del pronóstico es una suposición robusta.

Usando la estimación de la desviación estándar del pronóstico del error, se puede estimar la desviación estándar del error acumulado:

$$\sigma_E \approx \sqrt{\frac{1}{2\alpha}}\left(\frac{\text{DAM}}{0.8}\right)$$

Como la distribución normal es simétrica, los cálculos se pueden simplificar un poco. Recuerde que se quiere especificar una probabilidad que define un intervalo tal que sea probable que E_T no sea un evento al azar puesto que está fuera de este intervalo. Se define el intervalo en términos de la desviación estándar. Es decir

$$-K\sigma_E \leq E_T \leq K\sigma_E$$

El álgebra que sigue permite expresar el intervalo en términos de la razón del valor absoluto del error acumulado y DAM:

$$|E_T| \leq K\sigma_E$$

$$|E_T| \leq K\left(\sqrt{\frac{1}{2\alpha}}\left(\frac{\text{DAM}}{0.8}\right)\right)$$

$$\frac{|E_T|}{\text{DAM}} \leq \frac{K}{0.8}\sqrt{\frac{1}{2\alpha}}$$

En lugar de calcular DAM cada periodo, se estimará usando suavizamiento exponencial. Sea A_T la estimación inicial de DAM encontrada calculando la DAM real para una parte conocida de la serie de tiempo. Para los periodos subsecuentes, la estimación se actualiza mediante

$$\Delta_T = \beta |e_T| + (1 - \beta)\Delta_{T-1}$$

donde (3 es una constante de suavizamiento adecuada. Ahora se define el lado izquierdo de la última desigualdad, el cociente del valor absoluto del error acumulado y la estimación de DAM, como la señal de seguimiento en el tiempo *T:*

$$\rho_T = \frac{|E_T|}{\Delta_T}$$

Se denota el lado derecho de la desigualdad por r), y se le da el nombre de número crítico, definido como

$$\eta = \frac{K}{0.8}\sqrt{\frac{1}{2\alpha}}$$

donde a es la constante de suavizamiento del modelo de pronósticos y *K* es un número adecuado de desviaciones estándar. Si

$$\rho_T \leq \eta$$

se dice que el pronóstico está bajo control.

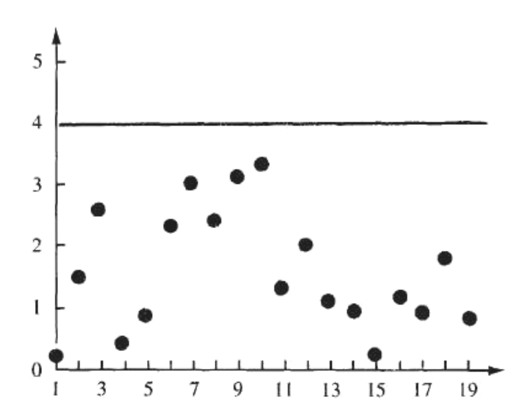
Recuerde que el 95% de una distribución normal queda dentro de ±2 desviaciones estándar, de manera que con *K = 2* una señal de seguimiento mayor que η ocurrirá, por azar, menos del 5% del tiempo. Si se usara a = 0.2, *con K* = 2, entonces η sería 3.95 ≈ 4. Los cálculos para la señal de seguimiento, usando una estimación suavizada de DAM con β = 0.2, están dados en la tabla 4-15 y graneados en la figura 4.15. Como todos los valores son menores que 4, la señal

TABLA 4-15

Cálculos para una señal de seguimiento

t	d_t	S_t	$e_t = d_t - S_{t-1}$	E_t	Δ_t	ρ_t
1	105	101	5	5	5.00	1.00
2	97	100	-4	1	4.80	0.21
3	107	101	7	8	5.24	1.53
4	109	102	8	16	5.79	2.76
5	83	98	-19	-3	8.43	0.36
6	109	100	11	8	8.95	0.89
7	117	103	17	25	10.56	2.37
8	106	103	3	28	9.05	3.10
9	96	101	-7	21	8.64	2.43
10	103	101	2	23	7.31	3.15
11	99	100	-2	21	6.25	3.36
12	88	97	-12	9	7.40	1.22
13	103	98	6	15	7.12	2.11
14	91	96	-7	8	7.09	1.13
15	94	95	-2	6	6.08	0.99
16	90	94	-5	1	5.86	0.17
17	100	95	6	7	5.89	1.19
18	81	92	-14	-7	7.51	0.93
19	85	90	-7	-14	7.41	1.89
20	113	94	23	9	10.53	0.85

FIGURA 4-15
Señal de seguimiento bajo control



de seguimiento indica que el pronóstico está controlado. Además, no existe una tendencia aparente en la señal de seguimiento, por lo que se continuará pronosticando con este modelo. En lugar de sólo pensar en el pronóstico como dentro o fuera de control, es mejor observar las tendencias. Además, si las observaciones sucesivas están cerca de la región fuera de control, se tiene un motivo de preocupación.

Observe que el número crítico no sólo depende del valor de *K* sino también de a, la constante de suavizamiento para suavizamiento exponencial simple. Si se usan otros modelos, r| ya no es teóricamente correcta. Sin embargo, en la práctica, al elegir valores de *r*\ entre 4 y 6 se tiene suficiente control para la mayor parte de las situaciones. Brown muestra que la variancia del error acumulado está dada aproximadamente por

$$\sigma_E^2 \approx \frac{1}{1-(1-\alpha)^{2n}}\sigma_\varepsilon^2$$

donde *n* es el numero de constantes de suavizamiento usadas. Así, para suavizamiento exponencial doble, la relación sería

$$\sigma_E^2 \approx \frac{1}{1-(1-\alpha)^{4}}\sigma_\varepsilon^2$$

7.3 Acción correctiva

Si la señal de seguimiento excede el número crítico, es un indicio de alerta, pero puede ser un evento aleatorio y no un cambio en el proceso. Si dos observaciones consecutivas están fuera de los límites, casi se tiene la seguridad de que algo anda mal. Suponga que se toman los datos de la tabla 4-7 y se suma 20 a todas las demandas después del periodo 5. Al recalcular el pronóstico y otros parámetros relevantes se obtiene la tabla 4-16. La gráfica de la señal de seguimiento se muestra en la figura 4-16.

El incremento de la demanda en el periodo 6 provoca que la señal de seguimiento tenga un salto; pero no fuera del límite de control de 4. Aunque la demanda alta continúa, la señal de seguimiento del periodo 7 parece bajo control. Sin embargo, la aparición de una tendencia en la señal de seguimiento debe advertir a la administración que puede existir un problema con el pronóstico. Los periodos posteriores están fuera de control; en la práctica, deben tomarse medidas en el periodo 9.

TABLA 4-16
Cálculos para una señal de seguimiento fuera de control

t	d_t	S_t	e_t	E_t	Δ_t	ρ_t
1	105	101	5	5	5.00	1.00
2	97	100	-4	1	4.80	0.21
3	107	101	7	8	5.24	1.53
4	109	102	8	16	5.79	2.76
5	83	98	-19	-3	8.43	0.36
6	129	104	31	28	12.95	2.16
7	137	110	33	61	16.96	3.60
8	126	113	16	77	16.77	4.59
9	116	113	3	80	14.01	5.71
10	123	115	10	90	13.21	6.81
11	119	115	4	94	11.37	8.27
12	108	113	-7	87	10.49	8.29
13	123	115	10	97	10.40	9.33
14	111	114	-4	93	9.12	10.20
15	114	114	0	93	7.29	12.7
16	110	113	-4	89	6.63	13.4
17	120	114	7	96	6.71	14.3
18	101	111	-13	83	7.97	10.42
19	105	109	-6	77	7.57	10.17
20	133	113	24	101	10.86	9.30

Cuando una señal de seguimiento excede el límite de control, es necesario buscar causas asignables. Si se encuentra alguna indicará la acción adecuada. Por ejemplo, suponga que una fuerte campaña de publicidad ha causado un salto en las ventas y se espera que la demanda permanezca en el nuevo nivel. Si se usó suavizamiento exponencial simple para pronosticar porque se supuso que el proceso permanecería constante —pero con un cambio en la demanda media— entonces se hace $E_t = 0$, se restablece la estimación de la demanda media y se continúa

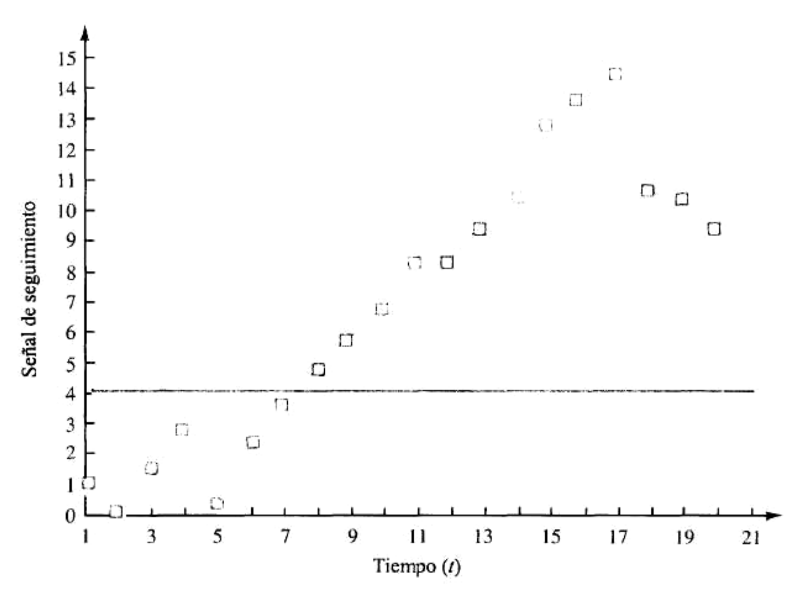


FIGURA 4-16
Señal de seguimiento fuera de control

aplicando suavizamiento exponencial simple. Si se espera que el crecimiento continúe, el modelo debe cambiar a uno con tendencia para reflejar las nuevas condiciones. Si ya se usaba un modelo con tendencia, debe volver a estimarse el coeficiente de la pendiente. Aun cuando el pronóstico recupere el cambio en la media del proceso, como ocurre en el periodo 9, debe establecerse $E_t = 0$ o se seguirá obteniendo una indicación de fuera de control.

Si no se puede encontrar una causa asignable, se supone que algo está mal con el modelo. Una estrategia razonable, si se usan modelos de suavizamiento exponencial, es aumentar el valor de la(s) constante(s) de suavizamiento. Hacer *N* más pequeña en un promedio móvil tendrá el mismo efecto. Esto ignorará más rápido la información antigua, lo que parece adecuado si las condiciones cambian con rapidez. Incluso si los nuevos términos son relevantes, como los de variación estacional, ignorar rápido los datos antiguos tenderá a seguir estos cambios.

SECCIÓN 7 EJERCICIOS

4.40. Calcule las medidas de error *e, E,* DAM, ECM y PAME para el pronóstico dado.

t	1	2	3	4	5	6	7	8
d,	375	348	373	337	314	332	283	257
F,	385	382	373	373	363	349	344	327
t	9	10	11	12	13	14	15	16
d,	269	238	231	225	201	189	219	191
F,	307	297	280	267	255	240	226	224

4.41. Dados los datos, calcule el pronóstico para junio usando un promedio móvil de tres meses y suavizamiento exponencial simple con a = 0.1 y a = 0.3. Calcule DAM para cada uno de febrero a mayo y diga qué modelo usaría.

Mes	Real	Pronóstico
Marzo	850	800
Abril	900	
Mayo	975	
Junio	950	

4.42. Dados los datos de la demanda mensual de un producto, determine el método de pronósticos que proporciona la menor desviación absoluta media para los últimos cuatro meses. {*Sugerencia:* grafique los datos primero y haga una suposición sobre el modelo esencial para el proceso.)

Observación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ventas	19	17	22	19	18	23	18	16	20	18

4.43. Una compañía usa suavizamiento exponencial simple con a = 0.1 para pronosticar la demanda de cajas de guantes de hule. El pronóstico de esta semana fue 237 cajas y la demanda real 205.

a) ¿Cuál es su pronóstico para la próxima semana?
b) ¿Cuál es su pronóstico para dentro de tres semanas?
c) Si la suma acumulada de los errores de pronóstico antes de esta semana era 23 y la estimación

de la desviación absoluta media era 10.6, ¿piensa usted que el sistema de pronósticos está funcionando bien? Explique.

4.44. AutoCell utiliza el método de Winters para pronosticar la demanda trimestral para sus baterías de automóvil. El pronóstico para este trimestre fue F_T = 107 baterías y la demanda real fue $d,$ = 97. Las estimaciones de la ordenada y la tendencia fueron S_T = 101 y B_T =18. Los factores estacionales son $c_{r—3}$ = 0.9, $c_{T—2}$= 1.0, $c_{r—,}$ = 1.2 y c_T = 0.9. Las constantes de suavizamiento son a =p = y = 0.1.

a) ¿Cuál es el pronóstico para el siguiente trimestre?
b) ¿Cuál es el pronóstico para dentro de dos periodos?
c) Si la estimación suavizada de los errores de pronóstico para este trimestre era 2.0 y la estima ción suavizada de la desviación absoluta media era 3.7, ¿piensa usted que el desempeño del sistema de pronóstico es bueno? Explique.

8 SOFTWARE

Existen cientos de paquetes de pronósticos disponibles para su aplicación en computadora, que van de los sencillos macros de Excel o Lotus a complicados paquetes estadísticos como SAS y SPSS. Existen paquetes para todos los métodos cuantitativos, incluyendo los bayesianos y redes neuronales, así como algunos de los métodos cualitativos. Debido a los rápidos avances en el campo no se presentará una investigación exnaustiva. Reilly (1990) y Fildes (1988) analizan los requerimientos de un paquete de software de pronósticos e ilustran algunos paquetes específicos. Compton y Compton (1990), Aghazedeh y Romal (1992) y Yurkiewicz (1993) realizaron otras investigaciones que enumeran paquetes y sus características. Las evaluaciones de paquetes específicos se publican en periódicos y revistas. Las revisiones de dos versiones de SmartForecasts son habituales y muestran la naturaleza dinámica de la industria del software; vea Perttula (1991) y Fuller (1993).

Tal vez lo más importante que se debe buscar en un paquete de software es el número de métodos de pronósticos que proporciona y cómo elige los métodos y los parámetros. Los paquetes menos costosos requieren que el usuario los especifique. La elección de los más adecuados casi siempre lleva mucho tiempo. Los mejores paquetes hacen una selección "óptima" tanto del método como de los parámetros, y la mayoría de ellos también permiten al usuario especificarlos, lo cual es una característica excelente.

La comunicación con otros paquetes es también una característica importante. Con frecuencia, la entrada viene de una base de datos y debe poder leerlos con facilidad. Además, la salida debe poderse exportar a generadores de informes. Para muchos usuarios es necesaria la compatibilidad con la hoja de cálculo. La salida gráfica hace que una audiencia más amplia entienda los resultados, y debe disponerse de características avanzadas, como predicción de intervalos y señales de seguimiento.

En cualquier caso, el paquete debe ser amigable. Si no lo es, muy pronto dejará de usarse por otro que lo sea. El usuario debe tener conocimientos básicos de los métodos que usa el paquete; esto asegurará que sea adecuado para la aplicación y dará al usuario confianza en los resultados.

Las necesidades de una situación particular dictarán qué tipo de paquete, si se necesita uno, debe usarse. El propietario de una franquicia de McDonald's que desea pronosticar las ventas totales (en dólares) para cada mes es probable que tenga suficiente con un paquete sencillo para computadora personal o incluso con una hoja de cálculo. Sin embargo, una compañía

grande que pronostica la demanda semanal de miles de artículos necesita un sistema más complejo. Las bases de datos corporativas proporcionan la entrada y es probable que sólo unas cuantas personas usen los pronósticos. En este caso, debe emplearse un enfoque de equipo de trabajo para definir las necesidades y comparar la disponibilidad de paquetes con los costos y los requerimientos.

Todavía más importante, el paquete debe ser sólo una parte del sistema de pronósticos. El juicio subjetivo y la intervención humana son necesarios; si no se usan, el resultado más probable será un desempeño muy pobre.

9 LOS PRONÓSTICOS EN LA PRÁCTICA

Se ha dicho, y muchos están de acuerdo, que los pronósticos son inciertos, imprecisos e inevitables. Esto último significa que todas las empresas deben pronosticar; la diferencia es la formalidad de su sistema de pronósticos. Como se vio en la presentación del software, una simple hoja de cálculo puede ser todo lo que se necesite. Una investigación reciente (Sanders y Manrodt, 1994) inica que en la práctica son preferibles las técnicas sencillas. No obstante, muchas compañías requieren un gerente de pronósticos y personal para desarrollarlos.

Se pueden encontrar entrevistas con algunas personas que se dedican a pronósticos en *The Journal of Business Forecasting;* vea ejemplos en Cristo y Jain (1992) y Geesaman y Jain (1992). De éstos se puede describir un situación de pronósticos típica. El número de artículos para los que se necesitan pronósticos es, por lo general, entre 500 y 3000. Casi siempre se hacen pronósticos para los siguientes doce meses, tanto en unidades como en dólares. Los pronósticos de unidades se usan para producción y los de dólares, para planeación financiera. Antes de completar el proceso, equipos compuestos de personal de producción, mercadotecnia y ventas analizan los pronósticos. Dos años de datos parece ser una cantidad común para hacer los pronósticos. Las desviaciones normales del pronóstico respecto a los valores reales van de 5 a 40%. Una buena fuente de información específica sobre aplicaciones es *The Journal of Business Forecasting;* Meyer (1992) presenta pronósticos para Schlegel Corporation y el cuadro 4-1 analiza pronósticos para Howmedica (Anderson, 1991).

Para reducir un número grande de artículos que requieren pronósticos, se categorizan en orden de importancia. Es común que un pequeño porcentaje (alrededor del 15%) de los artículos signifique un gran volumen de las ventas en dólares (cerca del 70%). Un segundo grupo de artículos (20%) corresponderá a otro 15%. El 60% restante de los artículos representa sólo alrededor del 15% de las ventas en dólares. La tercera categoría de artículos se pronostica como grupos que tienen características similares. Los métodos usados en la primera clase de artículos pueden ser complejos puesto que son los más importantes. Este concepto se conoce como análisis ABC y se describe con mayor detalle en el capítulo 6.

Fisher *et al* (1994) proponen la filosofía del pronóstico de **respuesta exacta,** basada en el reconocimiento de la diferencia entre el costo por faltantes y los precios rebajados (sección 2.5) y una categorización de los productos según la variancia del pronóstico. Ésta se puede obtener mediante un análisis estadístico de pronósticos múltiples de la demanda. Inicialmente, la compañía produce un pequeño porcentaje de los artículos con pronóstico de alta variancia y un porcentaje alto de los productos con pronóstico de baja variancia, esto libera capacidad para, más adelante, hacer artículos con alta variancia una vez que se cuente con más información, el resultado es menos faltantes y menos precios rebajados.

CUADRO 4-1

PRONÓSTICO DE DEMANDA EN HOWMEDICA

El pronóstico de la demanda en Howmedica se hace primero agrupando productos similares en familias y después estableciendo la etapa del ciclo de vida en la que está cada familia... la posición en el mercado, la tasa de uso y la repetición de compra son los elementos clave usados en la proyección de ventas de productos de introducción reciente... las expectativas de ventas de los administradores son, con frecuencia, mucho más altas que el pronóstico.

Howmedica es una división de Pfizer Hospital Products Group con centros de manufactura y distribución en todo el mundo. Los productos que se fabrican y venden se pueden dividir en tres categorías: 1) productos reconstructivos para reemplazo completo de coyunturas, 2) productos de trauma para ayudar a sanar fracturas de huesos y 3) instrumentación para sistemas genéricos y específicos. Estas tres categorías incluyen más de 6000 artículos en total, lo cual indica que deben pronosticarse tan eficientemente como sea posible.

La competencia está formada por divisiones de muchas compañías grandes de medicamentos, incluyendo Bristol Myers y Johnson & Johnson. Compiten en prácticamente todos los mercados que Howmedica sirve. La red de distribución está compuesta por distribuidores (llamados clientes) y agencias (llamadas ventas directas y carga de inventario).

¿POR QUÉ SE PRONOSTICA?

La política de Howmedica es surtir las órdenes a partir del inventario; esto requiere pronósticos de cada artículo. El departamento de manufactura usa las unidades de ventas pronosticadas (pronóstico de demanda) para la planeación de inventario a corto plazo y para la planeación de recursos a largo plazo. En la primera se usan los pronósticos como entrada al sistema MRP. Para el largo plazo se usan para determinar el nivel de empleados y los requerimientos para la planta y el equipo. Los pronósticos de demanda también se usan como entrada para la presupuestación departamental y de ventas.

PROCESO DE PRONÓSTICOS

Todos los pronósticos de ventas se originan en el departamento de pronósticos, que es el único responsable de esta función. Los pronósticos de ventas (unidades) se informan al departamento de finanzas como entrada al proceso de presupuestación financiera.

Los pronósticos en unidades (demanda de clientes) para nuevos pronósticos se desarrollan mediante simulaciones. Éstas se basan en los planes de lanzamiento de productos. El gerente de mercadotecnia aprueba estos planes, que después se cuantifican usando relaciones de inventario y de uso por el cliente.

Los pronósticos de ventas en unidades (demanda de clientes) para los productos existentes se preparan y aprueban exclusivamente en el departamento de pronósticos. Cada mes se revisa que sean razonables y se corrigen si es necesario. Además, aun cuando los pronósticos tengan buen seguimiento, deben corregirse al menos cada tres meses.

Se ha encontrado que la selección de un modelo de pronósticos para un producto dado depende mucho de la etapa en el ciclo de vida (productos de reciente introducción, productos maduros, productos con demanda decreciente y productos obsoletos) que estén bajo consideración; los modelos para pronósticos adecuados se analizan a continuación.

CUADRO 4-1
(continuación)

PRODUCTOS DE INTRODUCCIÓN RECIENTE

Cuando se trata de productos de introducción reciente se usa simulación para preparar los pronósticos de demanda de inventario, ya que ayuda a especificar los parámetros básicos necesarios para estimar la demanda en el momento del lanzamiento. La interacción de los detalles de entrada básicos, a su vez, produce el pronóstico del producto a nivel de artículo. Para el tipo de mercado industrial, como el de Howmedica, es común el uso de los siguientes parámetros:

1. Número de clientes: Esto se determina por consenso con los grupos de mercadotecnia y ventas. El total representa el número de clientes que quedarán activos a partir de los clientes ac tuales y que se generarán de fuentes externas. Si el nuevo producto está en un mercado en el que no se ha participado, su tamaño de mercado y participación potencial se estima a través de en cuestas de mercado primarias/secundarias. Sin embargo, la mayor parte del negocio inicial de un nuevo producto viene de los propios clientes. Al flujo inmediato de actividad debido a los propios clientes, sigue una conversión de las cuentas competitivas. El proceso de conversión competitiva casi siempre es lento.

2. Tasa de uso por el cliente: La tasa de uso por el cliente es el parámetro que sigue en impor tancia. Una vez que el sistema del nuevo producto se coloca con el cliente, el uso comienza casi de inmediato. El uso para Howmedica se da en términos del número de procedimientos quirúr gicos por cliente, por año. Cada procedimiento quirúrgico requiere una cantidad específica de familias distintas de componentes. El número de procedimientos quirúrgicos anuales se deriva de la experiencia con otros productos similares introducidos en el pasado.

3. Distribución de tamaños dentro de una familia: La distribución del uso de los artículos individuales dentro de las familias de productos, con frecuencia se relaciona con una distribu ción del tamaño anatómico. Las distribuciones anatómicas están directamente determinadas por la(s) distribución(es) de frecuencia de los tamaños físicos de las distintas partes del esquele to humano. Una vez que se estiman los parámetros anteriores, se calcula el pronóstico por ar tículo para cada periodo futuro (posterior al lanzamiento del nuevo producto), determinando los requerimientos de inventario en almacén para todos los clientes nuevos de ese periodo (car ga de inventario) y el uso proyectado para ese periodo por todos los clientes que estaban coloca dos hasta la fecha. En términos de una fórmula:

$$\text{Pronóstico del nivel de artículo} = (A \times B) + (C \times D \times E \times F)$$

donde A = nuevos clientes por periodo
B — inventario por cliente
C = clientes acumulados hasta la fecha
D - tasa de uso por periodo
E = distribución del tamaflo dentro de la familia
F = factor de carga de trabajo del periodo

Como ejemplo, en junio de 1991, Howmedica intenta colocar 50 (A) nuevos sistemas de cadera completa en hospitales que compran a la competencia. El sistema de cadera tiene 5 tamaños (de extra chico a extra grande) y el hospital recibe 2 (B) de cada tamaño para un total de 10 unidades. A la fecha, Howmedica ha acumulado 200 (C) nuevos clientes que usan este sistema, y la tasa agregada de procedimientos quirúrgicos es 2 (D) por mes. El tamaño mediano, al que se dedicará atención, se usa 35% (E) del tiempo. Como junio tiene 24 días hábiles, el factor de carga de trabajo del periodo es 1.166 (F). El factor de carga de trabajo se calcula como: 1.166 = 24 (número de días hábiles en un mes)/ 20.58 (días hábiles promedio por mes). Los días hábi-

CUADRO 4-1
(continuación)

les promedio por mes se calculan como 20.5 8 = 247 (días hábiles por año)/12 (número de meses en el afio).

El pronóstico de este artículo será

256 (unidades) = (50 x 2) + (200 x 2 x 0.35 x 1.166)

Estableciéndolo de manera más sencilla, la fórmula se vería:

(inventario para nuevos clientes) + (utilización de clientes existentes)

Como ésta es una simulación, las fórmulas se desarrollan de manera que se utilicen los datos de los campos de entrada, los cuales pueden cambiarse con facilidad.

Este pronóstico produce la cantidad de requerimientos a nivel de artículo. Debe analizarse la exactitud de los parámetros de entrada, que en realidad es lo que se está pronosticando. Los pronósticos expuestos se deben generar insertando todos los parámetros conocidos (base de clientes, tasas de uso, etc.) y después comparando el nivel de demanda real del artículo con el pronóstico para comprobar su validez.

PRODUCTOS MADUROS

Los productos que exhiben tendencias definibles y patrones estacionales sólidos se llaman productos maduros. Éstos deben tener al menos dos años de demanda histórica. Los pronósticos de tales productos se generan pronosticando la demanda de una familia de un sistema de productos. La familia se define como un grupo de productos de la misma línea con patrones de demanda similares. Los pronósticos de tales productos se generan pronosticando la familia independiente de un sistema de productos. La familia independiente se define como el grupo de productos que en realidad determina la demanda de otros miembros de la familia. Las otras familias (dependientes) dentro del sistema de productos tiene relaciones consistentes con la familia independiente. En otras palabras, cada vez que se realiza un procedimiento quirúrgico de cadera completa, se usan tres componentes:

1. Alma de cadera de metal (familia independiente)
2. Cubierta de cadera de metal (familia dependiente)
3. Inserto de plástico para la cubierta (familia dependiente)

Como se usa la misma cantidad (1) de cada componente, no es necesario pronosticar cada una, sólo la componente considerada como el indicador de actividad del sistema (alma de cadera de metal).

Dependiendo del producto, una familia independiente puede tener de cero a diez o más dependientes. Además, por el volumen evidente de productos que debe pronosticarse, se alterna entre dos conjuntos de familias independientes y se pronostica cada una un mes sí y otro no. El procedimiento para pronosticar estas familias es:

1. Se selecciona el grupo de familias independientes para pronosticar.
2. Se saca de la computadora principal la demanda histórica. La historia está en términos de unidades por día laborable, por mes. El número de días hábiles cada mes varía de un año a otro. Enero puede tener 10,15 o 16 días laborables, según el año.
3. Se descomponen los datos en estacionalidad y tendencia. La calidad de la tendencia se de termina por el buen ajuste. La calidad de la estacionalidad se determina mediante la cerca nía de los índices mensuales de los distintos años.

CUADRO 4-1
(continuación)

4. Se selecciona el modelo de pronósticos que represente mejor las características de este grupo de productos. Se usan modelos como el de descomposición. El pronóstico que pro porciona un modelo no es definitivo. Si el modelo da resultados que son contradictorios a los de la tendencia del ciclo de vida, éstos pueden ser más poderosos que los otros. Si la proyección del modelo parece razonable, los resultados se guardan en un archivo de hoja de cálculo.
5. Los pronósticos en unidades de familia se desglosan en pronósticos en unidades de miem bros usando sus relaciones pasadas.
6. Se mandan los nuevos pronósticos a la computadora principal y se guardan. La computa dora principal es más una instalación para almacenamiento de datos que para la prepara ción de pronósticos.
7. Después, los pronósticos de las familias independiente y la dependiente se usan para gene rar el pronóstico a nivel de artículos, usando un proceso que se llama forzamiento. Éste aplica un factor previamente calculado que se deriva del cálculo de la contribución de la demanda histórica del artículo a la demanda de la familia para los últimos seis meses. Este porcentaje de asignación se aplica a cada uno de los meses pronosticados que se actualiza ron en el archivo de pronósticos. Todo esto se hace en una PC. Los resultados de los pro nósticos generados en PC entonces se ajustan para distintos programas de mercadotecnia, incluyendo actualizaciones de productos y promociones.

PRODUCTOS CON DEMANDA DECRECIENTE

Éstos son los productos que todavía son viables, pero su demanda está disminuyendo. Periódicamente, se prueba si una familia de productos o un producto está o no en la etapa de declinación en su ciclo de vida. Para este tipo de productos, el mejor pronóstico se obtiene con promedios móviles simples y suavizamiento exponencial simple. Cuando se comparan los pronósticos obtenidos por un software estándar para PC, el promedio móvil de seis meses por lo general tiene mejor desempeño que cualquier otro. Cuando esto ocurre, se permite que la familia independiente y sus series dependientes sean pronosticadas con un promedio móvil simple. Esta técnica de pronósticos se utiliza hasta que los grupos de productos alcanzan su etapa de obsolescencia.

PRODUCTOS OBSOLETOS

El producto que se encuentra al final de su ciclo de vida se etiqueta como obsoleto. Periódicamente se evalúa si una familia dada de productos o un producto debe o no considerarse obsoleto. Esto se hace estudiando los datos históricos de ventas, las proyecciones de tendencia y las tendencias de la industria de productos similares. Luego, se comunican las recomendaciones a la administración para que se aprueben.

EXACTITUD DEL PRONÓSTICO

Con frecuencia se prueba la exactitud de los modelos preparando pronósticos expuestos (pronósticos para periodos en que se conocen datos reales). Esto ayuda a seleccionar un modelo adecuado. También indica qué tipo de error esperar en el futuro. La experiencia muestra que el tamaño del error depende mucho de la etapa en el ciclo de vida en que se encuentra el producto. En la etapa de introducción, la tasa de error puede oscilar entre 25% y 30%. Para los productos maduros, las tasas de error se encuentran alrededor de 10%. Los productos con ventas decrecientes tienen tasa de error de alrededor de 20%.

CUADRO 4-1
(continuación)

PROBLEMAS, RETOS Y OPORTUNIDADES

Con frecuencia es difícil comunicar a los usuarios de pronósticos la manera en que se desa rro liaron. El trabajo se hace aún más difícil cuando el usuario no tiene antecedentes en estadíí tica y pronósticos. Cuantos más entiendan cómo se preparan los pronósticos, mayor será su conoci miento sobre lo que un pronóstico puede hacer y lo que no. Muchas veces la expectativaí del usuario son mucho más altas que las del pronosticador. Además, por la falta de entendimiento con frecuencia los pronósticos no se usan correctamente. Pronosticar es una combinación entre el arte y la ciencia; aunque en la mente del usuario se trata más de un arte que de una ciencia Esta percepción tiene que cambiar. Esto se puede lograr no haciendo que lo que hacemos parpzca más difícil sino haciéndolo más sencillo.

Fuente: Anderson (1991). Usado con permiso.

10 EVOLUCIÓN

Es sencillo imaginar al hombre primitivo intentando predecir el regreso de las hordas de caza o el inicio de la primavera. Los pronósticos formales comenzaron con el trabajo de los matemáticos y los estadísticos hace varios cientos de años. En términos de los pronósticos que se conocen hoy, es probable que el trabajo pionero sea el libro de R. G. Brown (1962), que sigue siendo una referencia útil. También Box y Jenkins (1976) hicieron una contribución sustancial, trasladando los pronósticos a un nuevo territorio. Pero más que ninguna persona, la computadora a marcado el mayor cambio en los pronósticos y esos paquetes elaborados de bajo costo y de uso sencillo han puesto los pronósticos a la disposición de todos.

11 RESUMEN

En este capítulo se estudiaron los pronósticos. Se inició (secciones 1 y 2) con los sistemas de pronósticos vistos en el contexto de la solución de problemas. Primero se estableció la necesidad de un pronóstico. La disponibilidad de datos con frecuencia dicta el tipo de modelo/método de pronósticos que se usa, pero si no se dispone de datos ni es posible recopilarlos, se pueden usar modelos/métodos cualitativos, que incluyen investigaciones de mercado, opinión de expertos y el método Delphi (sección 3). Se analizaron estos modelos/métodos y se resaltaron las fortalezas y debilidades de cada uno. También se vieron aplicaciones prácticas.

Si se dispone de datos o se pueden recolectar, se usan modelos cualitativos. El enfoque para usar estos modelos es identificar el patrón que sigue el proceso, usar un modelo adecuado para ese patrón y elegir un método correcto para ese modelo. Si existe y se puede identificar una relación causa-efecto entre una o más de las variables independientes y la cantidad a pronosticar, se usan métodos causales (sección 4). La regresión lineal simple es una manera usual de pronosticar y se estudió con detalle. En ella, se estiman los parámetros mediante mínimos cuadrados y la ecuación que resulta proporciona el pronóstico. También se incluyó regresión múltiple.

TABLA 4-17
Resumen de métodos de pronósticos

Proceso	Método	Datos	Tiempo	Costo	Complejidad
Constante	Último dato	1	Corto	Bajo	Baja
	Promedio	>5	Corto, medio	Bajo	Baja
	Promedio móvil	5-10	Corto, medio	Bajo	Baja
	Suavizamiento exponencial	>3	Corto, medio	Bajo	Baja
Tendencia	Promedio móvil doble	>10	Corto, medio	Bajo	Moderada
	Suavizamiento exponencial doble	>10	Corto, medio	Bajo	Moderada
	Regresión	>10	Corto, medio, largo	Modesto	Moderada
Estacional	Suavizamiento de 3 factores de Winters	2 estaciones	Corto, medio	Modesto	Moderada
Desconocido	Investigación de mercado	Ninguno	Corto, medio, largo	Alto	Moderada
	Método Delphi	Ninguno	Corto, medio, largo	Alto	Moderada

Datos = número mínimo de período requerido   Costo   gastos del método
Tiempo = horizonte del pronóstico   Complejidad   facilidad de uso/comprensión

Si no es posible determinar las relaciones causales, se usan métodos de series de tiempo (sección 5). Los métodos más utilizados son promedio simple, promedios móviles y suavizamiento exponencial. Éstos se estudiaron para modelos de procesos constante, con tendencia y estacional. La tabla 4-17 resume varios métodos de pronósticos.

En la sección 6 se mencionaron algunas técnicas cualitativas, causales y de series de tiempo adicionales. Aunque son especializadas, avanzadas o no muy aceptadas para un estudio completo, se proporcionaron referencias con información más detallada.

El control de pronósticos (sección 7) es importante para cualquier sistema de pronósticos; debe tenerse una indicación sobre el desempeño del sistema. El error del pronóstico, las señales de seguimiento y las acciones correctivas se cubrieron con minucia.

Después se analizó el software para pronosticar y se dieron algunos comentarios sobre la experiencia práctica. El capítulo se concluyó con la evolución de los pronósticos.

MINICASO: BF SWINGS

Ben Floyd disfrutó en grande el taller de carpintería en la secundaria; así que usó parte de una herencia para comprar algunas herramientas básicas para trabajar la madera. Comenzó haciendo trabajos especiales y un día hizo un sofá-columpio para el porche de su casa. Varias personas lo vieron y le pidieron que les hiciera uno. Se corrió la voz y llegaron muchos clientes. En junio de 1991 se casó con Bobbie Ruth, graduada de mercadotecnia. Bobbie Ruth vio la oportunidad de ampliar el negocio de columpios a productos similares y eventualmente tener herramientas, material para construcciones y tiendas de muebles. Así nació BF Swings. Por el amor

a su trabajo y la habilidad mercadológica de Bobbie Ruth, el negocio prosperó. Hoy f&brican bancos y cunas además de columpios. La compañía tiene 35 empleados cinco días a la ¿emana con ventas cercanas a 1.4 millones de dólares. I

Sin embargo, no todo es color de rosa en BFS. Debido al crecimiento y la falta de conocimientos de Ben, piensan que se enfrentan a problemas serios. Para evitar esto han decidido contratar a alguien con conocimientos de sistemas de producción para ayudarlos. Después de entrevistar a muchos candidatos sobresalientes lo escogieron a usted para el puesto.

Se atacarán otros problemas más adelante, pero ahora Ben está preocupado por la producción del mes próximo. Lupe, la contadora, le dice que los costos del tiempo extra constituyen una gran parte de sus costos de operación y que deben contratar más trabajadores para reducirlo. Samir, el supervisor de la planta, les recuerda que con sólo agregar personal no se aumenta la capacidad, ya que se puede necesitar equipo adicional. Ben está de acuerdo, excepto que lijado, ensamble y terminado requieren muy poco o ningún equipo.

La siguiente tabla da el tiempo estándar de procesamiento (en minutos) para cada "operación" de los tres productos. Contiene el tiempo esperado disponible en cada departamento por semana. Este tiempo está ajustado para permitir el mantenimiento preventivo y el inesperado y el tiempo personal de los operadores. También se proporciona el número de empleados ique trabajan actualmente en el departamento.

	Tiempo de procesado (min)			**Disponibilidad**	
Departamento	**Banco**	**Cuna**	**Columpio**	**Horas**	**Personas**
Perforado	7	10	11	70	2
Tornos	15	0	0	35	1
Sierra de corte	3	16	10	105	3
Sierra caladora	0	3	4	35	1
Ranurado	0	10	8	70	2
Cepillado	0	22	11	105	3
Ruteadora/formadora	0	3	3	35	1
Nivelado	0	13	7	70	2
Lijado	5	25	35	145	4
Ensamble	12	30	45	150	4
Terminado	5	15	22	80	2

Bobbie Ruth ha guardado algunos registros de demanda. Se proporciona la demanda his tórica semanal para los tres productos. La demanda está en unidades, por ejemplo, niimero de bancos, cunas o columpios. Estos números incluyen los artículos vendidos y las órderies no sa tisfechas por faltantes. La semana 1 es la primera semana de enero de 1995 y la 117 es la cuarta de marzo de 1997.

Sem.	Banco	Cuna	Col.	Sem.	Banco	Cuna	Col.	Sem.	Banco	Cuna	Col.
1	105	234	18	21	104	234	321	41	95	299	22
2	101	248	21	22	99	249	338	42	106	266	15
3	106	276	28	23	100	292	50	43	98	305	18
4	108	225	16	24	108	261	27	44	113	273	14
5	91	228	29	25	105	264	64	45	90	292	27
6	101	247	25	26	99	265	44	46	80	326	15
7	100	275	22	27	107	261	222	47	100	277	19
8	101	251	24	28	96	256	30	48	100	256	22
9	109	251	27	29	96	254	200	49	75	246	27
10	108	241	37	30	107	304	30	50	106	312	22
11	88	236	24	31	98	279	33	51	88	320	32
12	100	254	26	32	85	262	89	52	95	292	21
13	102	248	28	33	86	261	198	53	132	277	29
14	99	229	139	34	116	265	34	54	100	275	18
15	100	243	161	35	126	299	278	55	109	295	32
16	109	254	216	36	95	291	75	56	102	308	28
17	102	272	112	37	99	321	168	57	106	262	23
18	99	249	76	38	111	295	104	58	100	318	24
19	113	248	275	39	115	277	41	59	105	306	29
20	96	302	41	40	108	275	24	60	107	303	38

Sem.	Banco	Cuna	Col.	Sem.	Banco	Cuna	Col.	Sem.	Banco	Cuna	Col.
61	88	281	25	80	106	320	44	99	106	309	24
62	99	341	25	81	105	312	42	100	118	345	23
63	121	302	22	82	86	341	111	101	94	357	20
64	113	303	21	83	99	350	35	102	81	330	20
65	97	324	28	84	104	364	37	103	106	323	25
66	86	344	198	85	113	310	185	104	107	327	27
67	101	311	177	86	100	289	139	105	88	368	31
68	100	271	173	87	95	356	81	106	110	325	27
69	96	320	65	88	100	331	50	107	88	348	22
70	116	305	295	89	103	342	161	108	121	336	32
71	104	332	264	90	115	308	133	109	94	361	26
72	102	323	66	91	107	335	29	110	101	350	23
73	99	293	204	92	95	352	20	111	113	343	27
74	114	324	56	93	92	362	15	112	86	356	18
75	101	311	44	94	109	343	22	113	95	353	27
76	88	324	267	95	116	356	22	114	101	308	22
77	94	328	300	96	103	324	34	115	103	345	27
78	100	355	311	97	104	348	17	116	103	342	21
79	110	317	236	98	96	337	21				

Prepare un informe para Ben recomendándole niveles de fuerza de trabajo para las siguientes ocho semanas. ¿Cuánta confianza tiene en sus resultados? Suponga que las demandas reales de los productos en las siguientes cuatro semanas se dan en la siguiente tabla:

Semana	Banco	Cuna	Columpio
117	100	344	24
118	109	352	146
119	90	368	279
120	106	361	64

¿Cambia esto su recomendación para las semanas 121 a la 124? Explique.

12 REFERENCIAS

Aghazadeh, S. M. y Romal, J. B., "A Directory of 66 Packages for Forecasting and Statistical Aijialysis", *The Journal of Business Forecasting,* verano 1992, pp. 14-20.

Anderson, T., "Demand Forecasting at Howmedica", *The Journal of Business Forecasting,* veraijio 1991, pp. 14-20.

Armstrong, J. S., "Forecasting by Extrapolation: Conclusions from 25 Years of Research",*\lNTER-FACES,* 14, 52-66,1984.

Avery, S. "Power Transmission Recovers: Manufacturers Hike Prices", *Purchasing,* 114,57-61, 1993.

Barron, M. y Targett, D., *The Manager's Guide to Business Forecasting,* Basil Blackwell, Ltd., Oxford, UK, 1985. Beasley, J. E., "Forecasting Environmental Protection Legislation Using Cross-Impact Analysís", *Long Range Planning,* 17, 132-138, 1984. Belt, D., "Neural Networks: Practical Retail Applications", *Discount Merchandiser,* 33, Ri|9-RT12, 1993.

Boehm, T. P., Mandy, D. M. y O Hará, M. D., "Modelling Aid to Families with Dependent Cjhildren", *Survey of Business,* 28, 2-9, 1992.

Box, G. E. P. y Jenkins, G. M., *Times Series Analysis—Forecasting and Control,* Holden-DayJ Inc. San Francisco, 1976.

Bradford, J. W. y Sugrue, P. K., "A Bayesian Approach to the Two-Period Style-Goods Inventóry Problem with Single Replenishment and Heterogeneous Poisson Demands", *Journal ofthe Operational Research Society,* 41, 211-218, 1990. Brown, R.G., *Smoothing, Forecasting and Prediction ofDiscrete Time Series,* Prentice Hall, Inj:., Englewood Cliffs, NJ, 1963.

Calzolari, G. y Panattoni, L., "Mode Predictors in Nonlinear Systems with Identities", *Inte\rnational Journal of Forecasting,* 6, 317-326, 1990.

Chester, M., *Neural Networks: A Tutorial,* Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993. Chu, C-H y Widjaja, D., "Neural Network Systems for Forecasting Method Selection", *Decisión Support Systems,* 12,13-24,1994.

Compton, J. C. y Compton S. B., *Successful Business Forecasting,* TAB Books, Blue Ridge Sufnmit, PA, 1990.

Cook, T. "Understand Your Customer Before Preparing Forecasts", *Journal of Business Forecasting Methods & Systems,* 13, 27-29,1994/1995.

Cristo, S. y Jain, C. L., "Forecasting at Colgate-Palmolive Company", *The Journal ofBusinesslForecasting,* primavera 1992, pp. 14-20.

Duncan, G., Gorr, W. y Szczypula, J., "Bayesian Forecasting for Seemingly Unrelated Time Series: Application to Local Government Revenue Forecasting", *Management Science,* 39, 275-293,1993.

Emmons , H., Flowers, A. D. Khot, C. M., y Mathur, K., *STORM: Quantitative Modeling for Decisión Support,* Holden-Day, Oakland, CA, 1989.

Ezop, P., "Datábase Marketing Research", *Marketing Research: A Magazine of Management & Applications,* 6, 34-41,1994. Fausett, L. V., *Fundamentáis of Neural Networks: Architectures, Algorithms, and Applications,* Prentice-Hall, Englewoood Cliffs, NJ, 1994.

Fildes, R., "Quantitative Forecasting—the State ofthe Art: Econometric Models", *Journal ofThe Operational Research Society,* 36, 549-580, 1985. Fildes, R., "Reviewing Forecasting Software—An Essay", *Journal ofThe Operational Research Society,* 39, 773-778, 1988. Fisher, M. L., Hammond, J. H., Obermeyer, W. R., y Raman, A., "Making Supply Meet Demand in an Uncertain World", *Harvard Business Review,* 72, 83-92, 1994. Fuller, M., "Software Review", *OR/MS Today,* diciembre 1993, pp. 58-60.

Geesaman, T. A. y Jain, C. L., "Forecasting at McCormick & Company", *The Journal of Business Fore-casting*, invierno, 1991-1992, pp. 3-5. Goldfarb, D. L. y Huss, W. R., "Building Scenarios for an Electric Utility", *LongRange Planning,* 21,
78-85, 1988. Goss, B. A., "The Forecasting Approach to Effíciency in the Wool Market", *Applied Economics,* 22,
973-993, 1990. Grambsch, P. y Stahel, W. A., "Forecasting Demand for Special Telephone Services—A Case Study",
InternationalJournal of Forecasting, 6, 53-64, 1990.
Greis, N. P. y Gilstein, C. Z., "Empirical Bayes Methods for Telecommunications Forecasting."*Interna-tionalJournal of Forecasting,* 7, 183-197, 1991. Huss, W. R., "A Move Toward Scenario Analysis", *InternationalJournal of Forecasting,* 4, 377-388,
1988. Jarrett, J., "Forecasting Seasonal Time Series of Corporate Earnings: A Note", *Decisión Sciences,* 21,
888-894, 1990. Kaynak, E., Bloom, J., y Leibold, M., "Using the Delphi Technique to Predict Future Tourism Potential",
Marketing Intelligence & Planning, 12, 18-29, 1994. Koch, P. D. y Koch, T. W., "Forecasting Stock Returns in the Japanese, UK and Us Markets During the
Crash of October 1987", *Managerial Finance,* 20, 68-89, 1994. Kress, G. J. y Snyder, J., *Forecasting and Market Analysis Techniques,* Quorum Books, Westport, CT,
1994. Lenk, P. J., "Hierarchical Bayes Forecasts of Multinomial Dirichlet Data Applied to Coupon Redemp-
tions", *Journal of Forecasting,* 11,603-619, 1992. Levenbach, H. y Cleary, J. P., *TheModern Forecaster: The Forecasting Process Through Data Analysis,*
Lifetime Learning Publications, Belmont, CA, 1984. Lin, E. Y. H., Sharma, B., y Otuteye, E., "An ARIMA Model for Canadian Union Membership Growth,
19U-19S5" Applied Economics, 24, 1035-1041, 1992. Lin, W. T., "Analysis and Forecasting of Income Statement Account Balances: The Dynamic Interdepen-
dency and ARIMA Approaches", *Journal of Forecasting,* 11, 283-307, 1992. Linstone, H. A., y Turoff, M., eds., *The Delphi Method, Techniques and Applications,* Addison-Wesley
Publishing Company, Reading, MA, 1975. Madsen, J. B., "Formation of Production Expectations Under Risk", *Journal ofEconomic Psychology,*
12,101-119,1991.
Maital, S., "Caution: Oracles at Work", *Across theBoard,* 30, 52-53, 1993. Makridakis, S. G. y Wheelwright, S. C, *Forecasting Methods and Applications,* John Wiley & Sons,
Nueva York, 1978. Makridakis, S. G. y Wheelwright, S. C, eds., *The Handbook of Forecasting, A Manager's Guide,* John
Wiley & Sons, Nueva York, 1987. Martino, J. P., *Technological Forecasting for Decisión Making,* Elsevier Science Publishing Company,
Nueva York, 1983. Mastio, R. C, "What Blow Molders Need from Their Machinery Suppliers", *Plastics World,* 52, 67,
1994.
Meyer, F., "Building Products Sales Forecasting at Schlegel", *The Journal of Business Forecasting,* in-vierno, 1991-1992, 23-24. Millet, S. M., "Battelle's Scenario Analysis of a European High-Tech Market", *Planning Review,* 20,
20-23, 1992. Montgomery, D. C, Gardiner, J. S., y Johnson, L. A., *Forecasting and Time Series Analysis,* McGraw-
Hill Book Company, Nueva York, 1990. Newbold, P., y Granger, C. W. J., "Experience with Forecasting Univariate Time Series and the Combi-
nation of Forecasts", *Journal of the Royal Statistical Society, Series A,* 137, 131-165, 1974.

Papalexopoulos, A. D., Hao, S. y Peng, T-M. "An Implementation of aNeural Network Based Load Forecasting Model for the EMS", *IEEE Transactions on Power Systems,* 9, 1956-1962, 1994. i
Perttula, L. W., "SmartForecasts II", *The Journal of Business & Industrial Marketing,* 6, 74-75» 1991.
Reilly, P. K., "What to Look for in Selecting an Automatic Forecasting Package", *Journal of Business Forecasting,* 9, 27-29,1990. Ringwood, J. V., Austin, P. C, y Montieth, W., "Forecasting Weekly Electricity Consumption"^ *Energy Economics,* 15,285-296, 1993. Sanders, N. R. y Manrodt, K. B., "Forecasting Practices in U. S. Corporations: Survey Results", *INTERFACES,* 24,92-100,1994. Scala, S. y McGrath, R., "Advantages and Disadvantages of Electronic Data lnterchange—An Industry Perspective", *Information & Management,* 25, 85-91,1993.
Schnaars, S. P., "How to Develop and Use Scenarios", *Long Range Planning,* 20,105-114,1987.
Schuler, A., Thompson, W. A., Vertinsky, I., y Ziv, Y., "Cross Impact Analysis of Technological Innovation and Development in the Softwood Lumber Industry in Canadá: A Structural Modéling ApproacK' ^T*EEE Transactions on Engineering Management,* 38, 224-236,1991. Sharda, R., "Neural Networks for the MS/OR Analyst: An Application Bibliography", *INTEkFACES,* 24,116-130,1994. Smith, B., *Focus Forecasting: Computer Techniques for Inventory Control,* CBI Publishing, Incorporated, Boston, 1978. Smith, T. "Explosive Demand Sparks Brisk Sales", *Computer Reseller News, Emerging Technologies Supplement,* diciembre, 12,10-12,1994. Stocks, J., "CD-ROM Down Under: A Delphi Study of CD-ROM in Australian Academic and Sjpecial Libraries", *Laserdisk Professional,* 3, 18-22,1990. Tegene, A. y Kuchler, F., "Evaluating Forecasting Models of Farmland Prices", *International Journal of Forecasting,* 10,65-80, 1994.
Theil, H., *Applied Economic Forecasting,* North Holland Publishing, Amsterdam, 1966. Toedter, K.-H., "Structural Estimation and Stochastic Simulation of Large Non-Linear Models", *Economic Modelling,* 9, 121 -128,1992. Vickers, B., "Using GDSS to Examine the Future European Automobile Industry", *Futures,* 24J, 789-812, 1992. Weerahandi, S., Hisiger, R. S., and Chien, V., "A Framework for Forecasting Demand for New Services and Their Cross Effects on Existing Services", *Information Economics & Policy,* 6,143-11)2,1994.
Winters, P. R., "Forecasting Sales by Exponentially Weighted Moving Averages", *Management Science,* 6, 324-342, 1960. Yong, Y. W., Keng, K. A., y Leng, T. L., "A Delphi Forecast for the Singapore Tourism Industry: Future Scenario and Marketing Implications", *International Marketing Review,* 6, 35-46, 1989
Yurkiewicz, J., "Forecasting Software: ClearingUp aCloudyPicture", *OR/MS Today,* 20,64-7,5,1993.

CAPÍTULO

5

Planeación agregada

1 INTRODUCCIÓN

Chris es propietario y director de una pequeña compañía que fabrica un producto —cajas de plástico para guardar discos de computadora—. Hacerlas es sencillo: se alimenta plástico a dos máquinas de moldeo por inyección; una máquina hace la tapa, y la otra hace la caja. Las dos partes se unen en forma manual, se colocan en cajas de empaque y se envían. Las máquinas de inyección son idénticas y pueden hacer 550 piezas por hora. Un trabajador puede unir las dos partes y colocar el producto terminado en las cajas a una tasa de 55 por hora.

A partir de los pronósticos, Chris espera ventas estables de 80 000 cajas al mes durante el próximo año. Con cuatro semanas al mes, esto significa 20 000 cajas por semana. Suponiendo que trabajan cinco días a la semana, la empresa debe fabricar 4000 cajas por día. Trabajando un turno de 8 horas y produciendo 500 cajas por hora se obtiene la cantidad deseada. Por lo tanto, Chris debe planear que las máquinas de moldeo por inyección operen a una tasa de 500 piezas por hora y debe tener 10 trabajadores para el ensamble.

Este plan de producción es casi ideal. La tasa de producción constante se puede satisfacer con capacidad constante; la capacidad se define como la cantidad que puede producir un sistema de producción. Para Chris, es sencillo diseñar la instalación para lograr 4000 cajas al día. La fuerza de trabajo será constante y la tasa de producción es un poco menor que la capacidad de personas y máquinas, lo que da una buena utilización sin sobrecargar las instalaciones. Debido a la tasa de producción constante, el uso de materia prima también es constante y como los proveedores y clientes están cerca, los envíos frecuentes de materia prima y producto terminado se conservarán bajo el inventario.

Desafortunadamente, la demanda constante es poco usual; cuando la demanda no es constante, la determinación de los niveles de producción se complica. Existen varias estrategias para manejar la fluctuación de la demanda. Se puede cambiar la demanda, producir a una tasa constante de todas maneras, variar la tasa de producción o usar una combinación. Esta estrategia es un plan de producción y es el tema de este capítulo.

2 INFLUENCIA EN LA DEMANDA

En lugar de planear respecto a una demanda fluctuante, es mejor convertir la demanda en constante. Existen tres enfoques para hacer esto:

No satisfacer la demanda durante los periodos pico.

- Cambiar la demanda de periodos pico a periodos no pico o crear una nueva demanda para los periodos no pico. '
- Producir varios productos con demanda pico en otros periodos.

La primera estrategia tiene una capacidad menor que la demanda pico y mantiene u aa tasa de producción constante dentro de la capacidad. Esta estrategia no satisface toda la demanda y se perderán algunas ventas. Los fabricantes de automóviles japoneses con frecuencia torian esta posición. Determinan el porcentaje de mercado y producen a ese nivel. Se espera después que el personal encargado de la comercialización venda esa cantidad. Muchas veces hayj faltantes. La facilidad de la planeación debe compararse con los ingresos perdidos.

Por lo general, crear una nueva demanda para los periodos no pico se hace a través de publicidad o de promociones. Los fabricantes de automóviles en Estados Unidos ofrecen descuentos durante los periodos no pico, esperando atraer a clientes nuevos. Un ejemplo cjlel área de servicios es el sistema de precios diferenciales de una compañía telefónica para anirriar a los clientes a hacer llamadas en periodos no pico. Estas estrategias son útiles para suavizar la demanda.

Por último, se pueden fabricar varios productos con patrones de demanda que se compensen. Para tener éxito, los productos deben ser similares, de manera que fabricarlos no iijnplique demasiadas diferencias. Un ejemplo serían motos para nieve y acuamotos, estos productos son complementarios, pues su tecnología es similar, pueden usar los mismos motores y el| trabajo de carrocería es similar. Otros ejemplos incluyen podadoras y removedores de nieve, abrigos y ropa de playa, botas y sandalias o equipo de fútbol y de béisbol.

3 PLANEACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

Cuando la demanda varía, los niveles de producción deseados no son obvios. Debe determinarse un **plan de producción** —cuántos y cuando fabricar cada producto—. La meta es hacer coincidir la tasa de producción y la tasa de demanda, para fabricar los productos cuando se necesitan.

Igual que con los pronósticos, la producción se planea para diferentes horizontes de tiempo a través de un enfoque jerárquico. Es común que se desarrollen tres planes con distintos horizontes, en forma secuencial. Éstos son los planes a largo, mediano y corto plazo. Den|tro de un enfoque de arriba hacia abajo, el plan a largo plazo se desarrolla primero y sus deci$iones se convierten en información de entrada para el plan a mediano plazo. Éste proporciona 1& entrada para un plan a corto plazo. El enfoque de abajo hacia arriba comienza con el corto plazo y trabaja hacia el largo plazo.

Cualquiera de los dos enfoques que se use, los tres planes operan en un **horizonte cambiante.** Un plan se hace para todos los periodos en el horizonte, pero en el siguiente periodo se elabora un nuevo plan. El primer periodo de un plan se congela, es decir, las decisiones para ese periodo se basan en el plan actual. No obstante, la decisiones tomadas en el segundo periodo dependen mucho más del nuevo plan desarrollado en el primer periodo. Para un horizonte de seis meses, el plan incluye decisiones de enero a junio. Las decisiones de enero se congelan, pero las de febrero a junio se completan más tarde. En enero, el plan se rehace para febrero a julio. Las decisiones para febrero pueden diferir de las del plan original, pero se basan en información actualizada. Debido a que la incertidumbre crece con la lejanía en el futuro, el horizonte dinámico permite cambios en periodos posteriores conforme se construyen los nuevos planes.

Un plan a largo plazo puede cubrir un periodo de 3 a 10 años y usualmente se actualiza cada año. Es un plan a nivel corporativo y considera todas las plantas y productos. La entrada es el pronóstico agregado a largo plazo y la capacidad real de la planta. Las unidades de medida para los pronósticos y la capacidad están agregadas, lo más probable en dólares o en horas estándar. Las decisiones se relacionan con la capacidad o los productos. Una decisión de capacidad puede consistir en construir una planta nueva o ampliar una existente. Un ejemplo de producto puede ser si la compañía amplía, contrata o elimina líneas de productos o crea nuevas. El plan determina los niveles gruesos de producción para cada planta y línea de producto y las necesidades de los proveedores a largo plazo.

Después se hace un **plan a mediano plazo.** Un horizonte intermedio es de 6 meses a dos años con actualizaciones mensuales o trimestrales. Los planes típicos se hacen para un año con actualizaciones mensuales. La entrada incluye decisiones sobre capacidad y productos del plan a largo plazo. De nuevo las unidades de medida están agregadas; pero tal vez por línea o familia de productos y departamentos en la planta. Las decisiones comunes son cambios en la fuerza de trabajo, máquinas adicionales, subcontratación y tiempo extra. También pueden formar parte del plan la determinación de los procesos que se usarán para cada familia de productos, las tasas de producción y los niveles de inventario. Estas decisiones identifican la cantidad de materia prima necesaria, y permiten firmar contratos con varios proveedores gracias a la capacidad.

Por último, se desarrolla un **plan a corto plazo.** Este plan puede cubrir de una semana a seis meses, con actualizaciones diarias o semanales. Es común un horizonte de un mes con actualización semanal. Determina el tiempo en que se hace un producto en particular en una máquina específica. Las unidades pueden ser productos específicos; y la capacidad, puede ser las horas disponibles en una máquina dada. Este plan determina el tiempo extra y el tiempo sobrante, al igual que la posibilidad de no satisfacer la demanda. Se dan detalles a los proveedores para que entreguen cantidades específicas en fechas establecidas. Recuerde que en la tabla 1-1 se dieron marco de tiempo, unidades, entrada y decisiones para tres tipos distintos de plantas.

La función de planeación de la producción puede ser muy compleja. Varios factores afectan esta complejidad, incluyendo el número de productos, el patrón de demanda y la incertidumbre, el número de periodos en el horizonte, los procesos alternativos para hacer el producto, la subcontratación, el tiempo extra y el inventario.

Este capítulo está dedicado a la planeación a mediano plazo. Se agregan diferentes productos en una unidad común; esto se conoce como **planeación agregada.** El enfoque es similar al de los problemas a largo y corto plazo.

4 ASPECTOS DE LA PLANEACIÓN AGREGADA

Los tres aspectos más importantes de la planeación agregada son la capacidad, las unidades agregadas y los costos. A continuación se hará un breve análisis de cada uno.

4.1 Capacidad

La capacidad se define como cuánto puede fabricar un sistema de producción. La definición de la capacidad depende del sistema: la capacidad de una universidad es distinta de la capacidad de una planta de General Motors, pero ambas indican cuánto puede producir el sistema.

La capacidad se mide de muchas formas diferentes; pero por lo general hay una piedida natural. Para la planta de General Motors, puede ser el número de automóviles producidos por hora. Para una universidad, podría ser el número de estudiantes que se gradúan por periodo. El nivel de detalle necesario puede dictar la medida usada. La capacidad de fabricación de un taller puede ser una preocupación mayor que toda la planta o de una unidad mercadológica. Como quiera que se midan, la capacidad y la demanda deben estar en las mismas unidad ss.

si largo

Para satisfacer la demanda, la capacidad del sistema debe excederla, al menos en plazo. Sin embargo, el exceso de capacidad es costoso. Una planta que puede producir 1000 unidades al día cuando sólo se requieren 500 tiene capacidad ociosa que representa un£ inversión desperdiciada. En el corto plazo, se pueden hacer cambios en la capacidad, pero ca£i siempre son pequeños. Por ejemplo, se puede usar tiempo extra. Los grandes cambios en lacapacidad requieren un tiempo más largo y se hacen en incrementos discretos, como construir una planta o agregar una máquina o un turno.

4.2 Unidades agregadas

La producción incluye muchos productos hechos de diversas maneras. Los planes a mediano y largo plazo no necesitan este nivel de detalle, por lo que los productos se juntan para| formar uno solo. Los planes a largo plazo se llaman **planes de capacidad;** los planes a mediano plazo se llaman **planes agregados.**

Con frecuencia, un producto agregado se expresa en términos de tiempo o dinero;. Al hacerlo, se pueden agregar los diferentes productos usando la misma unidad de medida. Por sencillez, suponga que los productos A, B y C requieren 5,2.5 y 0.75 horas de producción^ respectivamente. Para convertir la demanda mensual de los productos a demanda mensual de jioras de producción, se multiplica el tiempo requerido para producir cada producto por el número necesario, y se suman. Este proceso da una demanda mensual para un producto agregado <;n horas de producción. Si la demanda de A es 200 unidades, la demanda de B es 100 y la de C una demanda equivalente de horas de producción es

$$5 \times 200 + 25 \times 100 + 0.75 \times 1000 = 2000 \text{ horas}$$

2S 1000,

Un producto agregado en dólares se define de manera análoga usando el costo de producción en lugar del tiempo de producción.

La capacidad se debe medir en las mismas unidades que la producción agregada. L: as horas son una medida natural; la capacidad es la cantidad de horas disponibles por unidad dej tiempo. Con 50 trabajadores de tiempo completo hay 50 x 168 = 8400unidades de tiempo de produc ción disponible por mes. El tiempo se puede convertir a dólares usando las tasas estjándar de mano de obra y el costo del equipo.

4.3 Costos

Muchos costos afectan el plan de producción. En términos generales son los costos de produc ción, los costos de inventario y los costos de cambiar la capacidad.

Los costos de producción incluyen materiales, mano de obra directa y otros costofc atribuibles a producir una unidad, por ejemplo, costos de tiempo extra o de subcontratación. [Los costos que son constantes respecto a la decisión que se va a tomar deben ignorarse. Los Costos de

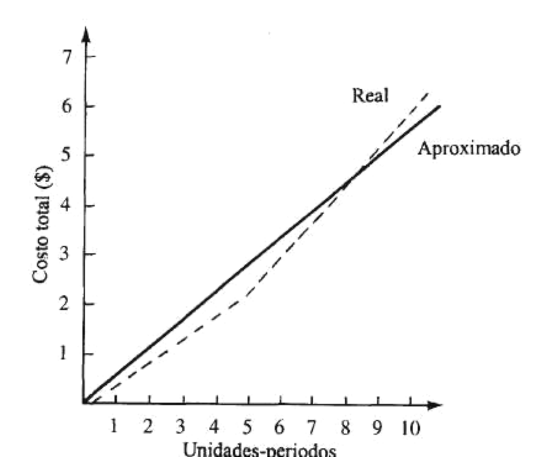


FIGURA 5-1
Costos de almacenaje típicos

reparaciones generales pueden ser constantes ya que se incurre en ellos independientemente del plan de producción que se use. Los costos de otras reparaciones relacionadas con el proceso pueden afectar las decisiones y deben incluirse. La situación particular determina qué costos hay que considerar.

Los costos relacionados con el inventario son almacenaje y faltantes. El coeficiente del costo de almacenaje es el costo real de mantener una unidad en inventario durante un periodo. Incluye los costos de pérdida de oportunidad, seguros, impuestos, artículos averiados, hurtos, desperdicios, equipo y personal para manejar el inventario y, tal vez, espacio. Incluye sólo los costos afectados por las decisiones tomadas. Una unidad vendida pero no entregada debido a un faltante se llama orden atrasada. El coeficiente de costos por faltantes se calcula para una unidad que falta en un periodo. Incluye los registros especiales y el manejo de los artículos en las órdenes atrasadas, al igual que la pérdida del ingreso y de la buena voluntad de los clientes. En una situación de manufactura, si el "cliente" es la siguiente etapa del proceso y ocurre un faltante, puede ser que tenga que parar toda la planta; el resultado sería un costo por faltantes muy alto. El capítulo 6 da más detalles sobre los costos de inventario.

Con frecuencia, se supone que los costos de almacenaje y por faltantes son lineales. Así, el costo de mantener dos unidades en inventario es el doble de mantener una. En la realidad, ninguno de los dos es lineal. Por ejemplo, si toda la demanda se forma de órdenes atrasadas, es probable que los clientes encuentren otros proveedores, y el costo sería muy alto. De igual manera, no es probable que el costo de almacenar 1000 unidades durante un periodo sea 1000 veces el costo de una unidad en inventario el mismo tiempo. Se supone que la aproximación lineal es razonable dentro del rango de valores probables. El análisis de sensibilidad puede ayudar a validar tal suposición. En la figura 5-1 se da una gráfica de los costos de inventario. Se muestra la curva de costos reales y una aproximación lineal. Una gráfica de costos por faltantes sería similar.

Los costos de cambio en la capacidad incluyen la contratación y capacitación de trabajadores, y pueden incluir un costo de la capacidad perdida hasta que el trabajador esté bien entrenado. Al despedir trabajadores se incurre en costos directos de separación y costos similares a la pérdida de buena voluntad. Una compañía que despide trabajadores con frecuencia encuentra difícil contratarlos. Los costos de contratación y despido son similares a los de inventario y faltantes.

Después de estudiar la capacidad, la manera de agregar y los costos, se verán los rhétodos para generar un plan de producción agregado. El enfoque de la planeación agregada s^ puede usar para productos específicos. Si se trata de muchos productos, la complejidad aumenta mucho. Existen dos tipos de enfoques: los métodos con hoja de cálculo y los métodos cuantitativos. Se comenzará con los métodos con hoja de cálculo.

SECCIÓN 4 EJERCICIOS

5.1. Señale productos complementarios para lo siguiente:

a) Bloqueador para sol
b) Botas de esquiar
c) Podadoras
d) Sofás columpio
é) Cascos para hockey
f) Canoas de aluminio

5.2. Explique cómo mediría la capacidad de lo siguiente:

á) Un restaurante de hamburguesas preparadas en serie
b) Su departamento académico
c) Una camioneta de carga *{pick-up)*
d) La cocina de su casa
e) Una operación de reparto de pizzas
/) Una oficina de correos
g) Un fabricante de lápices

5.3. ¿Qué costos deben considerarse en la planeación agregada?
5.4. ¿Qué haría si un costo, digamos el costo por faltantes, no es lineal?
5.5. ¿Por qué se pronostica y se planea para más de un periodo?

5 MÉTODOS CON HOJA DE CÁLCULO

Existen muchas formas de desarrollar un plan de producción. Se examinará un método sencillo que puede no obtener la mejor solución, pero con frecuencia proporciona soluciones buenas. Este método es un enfoque de prueba y error, fácil de implantar con una hoja de cálculo. El enfoque se ilustrará con un ejemplo sencillo.

Se tienen dos estrategias opuestas. La primera, una estrategia de **inventario cero,** produce la demanda exacta en cada periodo, lo que requiere una fuerza de trabajo variable. La segunda, una estrategia de **nivel de producción,** fabrica una cantidad constante cada periodo. Las variaciones en la demanda se satisfacen manteniendo un inventario. Además, hay una estrategia mixta; en la que se dispone tanto de un inventario como de una fuerza de trabajo cambiante.

Precisión Transfer, Inc. hace más de 300 productos diferentes, todos engranes ¡de precisión. Las operaciones para hacerlos son similares, pero el tiempo y los materiales requeridos son distintos. Como todos los engranes hechos por Precisión son similares, la unidad para agregar es un engrane. Un engrane agregado se define a partir de estándares para los engranes que deben hacerse en los próximos seis meses. Los pronósticos de la demanda agregada jse dan en la tabla 5-1.

TABLA 5-1
Pronóstico de la demanda agregada para engranes de precisión

Mes	**Enero**	**Febrero**	**Marzo**	**Abril**	**Mayo**	**Junio**	**Total**
Demanda (cajas)	2760	3320	3970	3540	3180	2900	**19** 670

El año pasado, Precisión fabricó 41 383 engranes de distintos tipos. Se trabajaron 260 días y se tuvo un promedio de 40 trabajadores. Entonces, Precisión fabricó 41383 engranes en 10 400 días-trabajador. En promedio, un trabajador puede hacer

$$\frac{41\,383 \text{ engranes/año}}{10\,400 \text{ días-trabajador/año}} = 3.98 \approx 4 \text{ engranes/días-trabajador}$$

Los costos de producción, excluyendo la mano de obra, no cambian en el horizonte de planeación y se ignoran. Una unidad producida pero no vendida en el mes se cuenta como inventario durante todo el mes (inventario de fin de mes). También puede usarse el inventario promedio mensual. El costo de mantener el inventario de fin de mes es $5 por engrane por mes. Al principio de cada mes se pueden contratar nuevos trabajadores a un costo de $450 por trabajador. Los trabajadores actuales se puede despedir a un costo de $600 por trabajador. Los salarios y beneficios para un trabajador son de $ 15 por hora, pero a todos se les pagan 8 horas de trabajo al día. Ahora se tienen 35 trabajadores.

5.1 Plan de inventario cero

Primero se desarrolla un plan de inventario cero (también llamado plan de lote por lote) para Precisión. Cada mes se produce justo la cantidad demandada, y no se almacena. Los trabajadores se aumentan cuando crece la demanda y se despiden cuando decrece. Se quiere encontrar el número de trabajadores necesarios cada mes. La tabla 5-2 muestra los cálculos para el plan de inventario cero, dados en un formato de hoja de cálculo. Algunas partes de la tabla no se usan para este plan, pero se conservan para preservar la consistencia en el formato de la tabla usado para todos los planes.

El número de engranes que puede hacer un trabajador por mes es igual al número que un trabajador produce en un día multiplicado por el número de días del mes. El número necesario de trabajadores en el mes es la demanda del mes dividida entre el número de engranes mensuales que puede hacer un trabajador. Esto es,

$$\text{Trabajadores necesarios} = \frac{\text{demanda/mes}}{(\text{días/mes}) \times (\text{unidades/trabajador/día})}$$

Un trabajador produce cuatro engranes al día y en enero hay 21 días hábiles, por lo que un trabajador puede fabricar 84 engranes en enero. Al dividir 2760 entre 84 se obtiene un requerimiento de 32.86 trabajadores para producir la demanda de enero. Si no se permiten trabajadores de tiempo parcial ni horas extra, se redondea a 33 trabajadores. El renglón 2 de la tabla muestra el número de unidades producidas en un mes por un trabajador. Se encuentra multiplicando el renglón 1 por el 4, el número de engranes que puede hacer un trabajador en un día. El renglón 4, que se obtiene dividiendo el renglón 3 entre el 2 y redondeando, indica los trabajadores necesarios para cada mes restante.

TABLA 5-2
Plan de inventario cero

		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Total
1	Días Unidades/trabaj ador	21 84 2	20 80 3	23 92 3	21 84 3	22 88 3	22	129 516 19
2 3	Demanda Trabajadores	760 33	320 42	970 44	540 43	180 37	88 2	670 232 nd
4 5	necesarios Trabajadores	35 0	33 9	42 2	44 0	43 0	900	11
6	disponibles Trabajadores						33	
	contratados						37 0	
7	Costo de contratación	0	4 050	900	0	0	0	4 950
8	Trabajadores despedidos	2	0	0	1	6	4	13
9	Costo de despido	1200	0	0	600	3 600	2 400	7 800
10	Trabajadores empleados	33	42	44	43	37	33	232
11	Costo de mano de obra	83 160	100 800	121440	108 360	97 680	87 120	598 560
12	Unidades producidas	2 760 0	3 320 0	3 970 0	3 540 0	3 180 0	2 900 0	19 670 nd
13	Inventario neto							
14	Costo de almacenaje	0	0	0	0	0	0	0
15	Costo órdenes atrasadas	0	0	0	0	0	0	0
16	Costo total	84 360	104 850	122 340	108 960	101 280	89 520	kíl 310

Producción = 4 unidades/trabajador/día
Costo de contratación = $450/trabajador
Costo de almacenaje = $5/unidad/mes
Salarios y beneficios = $120/trabajador/día
Costo de despido = $600/trabajador Costo de orden atrasada = $15/unidad/mes

Ahora se ajusta el número de trabajadores disponibles con el número necesario. Si no se tienen suficientes, se contratan más. Si hay demasiados, se despide algunos.

Trabajadores contratados = máx {0, trabajadores necesarios - trabajadores disponibles}

Trabajadores despedidos = máx {0, trabajadores disponibles - trabajadores necesarios}

En enero se tienen 35 trabajadores disponibles (renglón 5). Se necesitan 33 trabajadores por lo que se despide a dos de ellos (renglón 8). El costo de despedir a dos trabajadores es

$600/trabajador x 2 trabajadores (renglón 8) =$1200 (renglón 9)

Se paga a los empleados por trabajar 8 horas/día cada día hábil del mes, entonces los salarios y prestaciones para enero son

$15/hora x 8 horas/día x 21 días (renglón 1) x 33 trabajadores (renglón 10) =

$83 160 (renglón 11)

Al iniciar febrero se dispone de 33 trabajadores (enero, renglón 10). Se necesitan 42 (renglón 4), por lo que se contrata a nueve (renglón 6), lo que da 42 (renglón 10) para febrero. El costo de contratarlos es $4050 (renglón 7), que se obtiene multiplicando el número dontratado

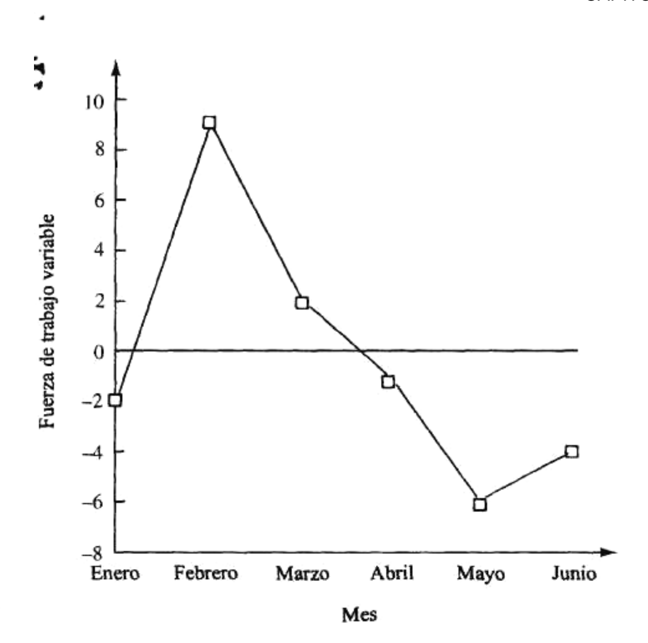


FIGURA 5-2
Plan de inventario cero

(renglón 6) por $450. Todos los renglones que contienen costos están sombreados. Los resultados de los cálculos para el resto de los meses se pueden encontrar en la tabla 5-2. Se puede producir

capacidad = trabajadores x días x unidades/trabajador/día

engranes al mes. En enero, los 33 trabajadores (renglón 14) pueden producir cuatro engranes por día durante 21 días (renglón 1), o sea 2772 engranes; es decir

$$2772 = 33 \times 21 \times 4$$

Como la demanda de enero es 2760, se planea producir sólo esa cantidad. Esto es,

unidades producidas = min {demanda, capacidad}

La capacidad depende del número de trabajadores que, para el plan de inventario cero, se determinó para satisfacer la demanda. Así, la capacidad siempre es tan grande como la demanda.

No se usan 3 días-trabajador, o el tiempo para producir 12(2772 - 2760) engranes. El costo de mano de obra incluye todos los días-trabajador y, por lo tanto, incluye el costo de la capacidad no usada.

La última columna de la tabla 5-2 muestra los totales para el horizonte de seis meses. El plan termina con 33 empleados y nada en inventario. El costo total es $611 310.

En la figura 5-2 se presenta una gráfica de los cambios en la fuerza de trabajo. En enero se despiden dos trabajadores y en febrero se contratan nueve. Más trabajadores se despiden en los tres meses que siguen y en junio se contratan dos. Hay un total de 11 trabajadores contratados y 13 despedidos durante los seis meses. Se tienen 33 trabajadores al terminar junio. Esta gráfica resalta la variabilidad en la fuerza de trabajo para tener un plan de inventario cero, fenómeno no deseable.

5.2 Plan de fuerza de trabajo nivelada

A continuación se estudia otro extremo, un plan de fuerza de trabajo nivelada. Usa el inventario producido en periodos no pico para satisfacer la demanda de los periodos pico y se llama plan de producción nivelada o de fuerza de trabajo constante, porque se usa el mismo númeío de trabajadores en todos los periodos.

Dividiendo la demanda para todo el horizonte entre los engranes que puede producir un trabajador en ese horizonte, se obtiene el número constante de trabajadores necesario. Dado que un trabajador hace cuatro engranes al día, en el horizonte de planeación (129 días) se necesitan 39 trabajadores todo el tiempo ([19 670/(4 x 129)] = 38.12). Al usar siempre 39 trabajadores en la hoja de cálculo se obtienen los resultados de la tabla 5-3.

Se contratan cuatro trabajadores en enero y se produce la cantidad máxima,

$$4 \times 21 \times 39 = 3276 \text{ engranes}$$

En enero, se produce más que la demanda por lo que quedará inventario. Para enero se tienen

3276 producidas (renglón 12) - 2760 vendidas (renglón 3) = 516 en inventario (religión 13)

Mantener una unidad en inventario durante un mes cuesta $5; el costo de almacenaje será

$$\$5 \times 516 = \$2580 \text{ (renglón 14)}$$

TABLA 5-3
Producción constante: órdenes atrasadas

		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Total
1	Días	21	20	23	21	22	22	129
2	Unidades/trabaj ador	84	80	92	84	88	88	516
3	Demanda	2 760	3 320	3 970	3 540	3 180	2 900	19 670
4	Trabajadores necesarios	39	39	39	39	39	39	234
5	Trabajadores disponibles	35	39	39	39	39	39	nd
6	Trabajadores contratados	4	0	0	0	0	0	4
7	Costo de contratación	1800	0	0	0	0	0	1 800
8	Trabajadores despedidos	0	0	0	0	0	0	0
9	Costo de despido	0	0	0	0	0	0	0
10	Trabajadores empleados	39	39	39	39	39	39	234
11	Costo de mano de obra	98 280	93 600	107 640	98 280	102 960	102 960	603 720
12	Unidades producidas	3 276	3 120	3 588	3 276	3 432	2 978	19 670
13	Inventario neto	516	316	-66	-330	-78	0	nd
14	Costo de almacenaje	2 580	1580	0	0	0	0	4 160
15	Costo de órdenes atrasadas	0	0	990	4 950	1 170	0	7110
16	Costo total	102 660	95 180	108 630	103 230	104 130	102 960	616 790

Producción = cuatro unidades/trabajador/día
Costo de contratación = $450/trabajador
Costo de almacenaje = $5/unidad/mes
Salarios y beneficios = $120/trabaj ador/día
Costo de despido = $600/trabajador Costo de orden atrasada = $15/unidad/mes

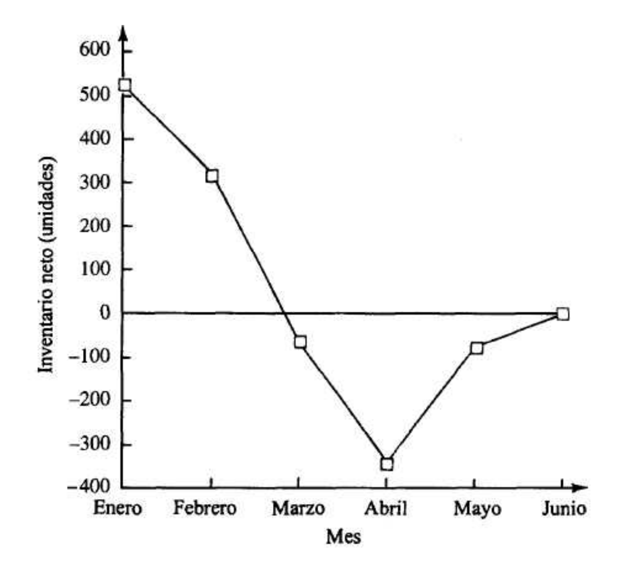


FIGURA 5-3
Producción constante: faltantes

El inventario de febrero es el inventario de enero más la producción de febrero menos la demanda de febrero:

$$516 + 4 \times 20 \times 39 - 3320 = 316$$

Observe que la producción es mayor que la demanda porque se necesitan más de 38 trabajadores para fabricar 19 760 engranes en seis meses.

Este enfoque no consideró el tiempo en que la demanda es pico. En marzo, el inventario (renglón 13) baja a -66. La producción acumulada durante marzo fue menor que la demanda acumulada; se vendió más de lo que se produjo. El inventario negativo, llamado órdenes atrasadas o faltantes, se fabricará y enviará más adelante. Si el costo de una orden atrasada es $15/unidad/mes, el costo para marzo es

$$\$15 \times 66 = \$990$$

La producción de junio es 2978, que cubre la demanda para junio y los faltantes de mayo.

El plan termina sin inventario, 39 trabajadores y un costo de $616 790. La figura 5-3 muestra una gráfica del inventario neto. En contraste con el plan de inventario cero, este plan tiene una fuerza de trabajo constante e inventario variable. Minimiza los costos de contratación y despido, pero aumenta el costo de almacenaje y de faltantes.

¿Qué debe hacerse si no se permiten faltantes? Si se divide la demanda total entre los días de trabajo y se multiplica por los engranes diarios, se obtiene el número de trabajadores para producir todas las unidades a lo largo del horizonte; pero es necesario tener suficientes trabajadores cada mes. Entonces la producción acumulada debe ser igual o exceder la demanda acumulada para cada periodo. Para obtener el número de trabajadores necesario para un periodo acumulado, se divide la producción acumulada entre las unidades producidas por trabajador:

$$\text{trabajadores (acumulado)} = \frac{\text{demanda acumulada}}{\text{días acumulados} \times \text{unidades/trabajador/día}}$$

TABLA 5-4
Número constante de trabajadores necesarios para no tener faltantes

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Días/mes	21	20	23	21	22	22
Suma de días	21	41	64	85	107	129
Demanda	2 760	3 320	3 970	3 540	3 180	2 900
Suma de demanda	2 760	6 080	10 050	13 590	16 770	19 670
Trabajadores	33	38	39	40	39	38

En enero, la demanda acumulada es 2760 y los días acumulados son 21, entonces se necesitan

$$32.86 \text{ trabajadores} = 2760/(21\text{x}4) \text{ o}$$

33 trabajadores. En febrero se tiene

$$37.07 \text{ trabajadores} = (2760+ 3320)/[(21 + 20) \text{ x } 4] = 6080/(41 \text{ x } 4)$$

es decir, se necesitan 38 trabajadores en los dos primeros meses para asegurar que no habrá faltantes. La tabla 5-4 da los resultados para todo el horizonte de planeación. El número máximo de trabajadores es 40 (de enero a abril), o sea, el plan de fuerza de trabajo nivelada pide 40 trabajadores cada mes.

En enero se produce con toda la capacidad que es mayor que la demanda. En febrero y marzo se produce toda la capacidad, que es menor que la demanda. El exceso de producción de enero cubre la demanda de estos meses. En abril se produce sólo lo suficiente para satisfacer la demanda y el inventario es cero. Después de abril, al producir con toda la capacidad $e forma

TABLA 5-5
Producción constante: sin faltantes

		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Total
1	Días	21	20	23	21	22	22	129
2	Unidades/trabajador	84	80	92	84	88	88	516
3	Demanda	2 760	3 320	3 970	3 540	3 180	2 900	19 670
4	Trabajadores necesarios	40	40	40	40	40	40	420
5	Trabajadores disponibles	35	40	40	40	40	40	nd
6	Trabajadores contratados	5	0	0	0	0	0	5
7	Costo de contratación	2 250	0	0	0	0	0	2 250
8	Trabajadores despedidos	0	0	0	0	0	0	0
9	Costo de despido	0	0	0	0	0	0	0
10	Trabajadores empleados	40	40	40	40	40	40	234
11	Costo de mano de obra	100 800	90 600	110400	100 800	105 600	105 600	6^19 200
12	Unidades producidas	3 360	3 200	3 680	3 350	3 180	2 900	19 670
13	Inventario neto	600	480	190	0	0	0	nd
14	Costo de almacenaje	3 000	2 400	950	0	0	0	6 350
15	Costo de órdenes atrasadas	0	0	0	0	0	0	0
16	Costo total	106 050	98 400	111 350	100 800	105 600	105 600	¿27 800

Salarios y beneficios = $120/trabajador/día
Costo de despido = $600/trabajador Costo de orden atrasada = $15/unidad/mes

Producción = cuatro unidades/trabajador/día
Costo de contratación = $450/trabajador
Costo de almacenaje = $5/unidad/mes

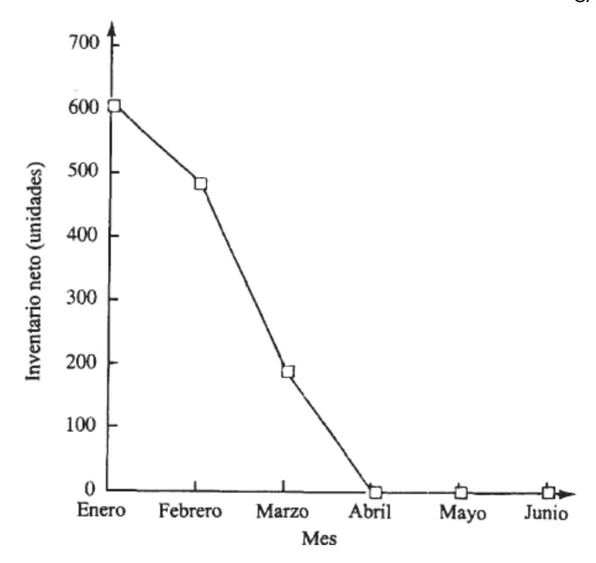


FIGURA 5-4
Producción constante: sin faltantes

un inventario, por lo que se produce sólo la demanda. Cualquier mes que requiere el máximo número de trabajadores termina con inventario cero. Después de ese mes se produce para almacenar si un mes posterior necesita el máximo número de trabajadores. La tabla 5-5 muestra algunos cálculos para el plan de fuerza de trabajo constante sin faltantes. Al final de junio, no hay inventario, se tienen 40 personas y el costo de los seis meses es $627 800. La gráfica del inven-

TABLA 5-6
Un plan mixto

		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Total
1	Días	21	20	23	21	22	22	129
2	Unidades/trabajador	84	80	92	84	88	88	516
3	Demanda	2 760	3 320	3 970	3 540	3 180	2 900	19 670
4	Trabajadores necesarios	38	38	42	42	35	35	230
5	Trabajadores disponibles	35	38	38	42	42	35	nd
6	Trabajadores contratados	3	0	4	0	0	0	7
7	Costo de contratación	1350	0	1800	0	0	0	3 150
8	Trabajadores despedidos	0	0	0	0	7	0	7
9	Costo de despido	0	0	0	0	4 200	0	4 200
10	Trabajadores empleados	38	38	42	42	35	35	230
11	Costo de mano de obra	95 760	91200	115 920	105 840	92 400	92 400	593 520
12	Unidades producidas	3 192	3 040	3 864	3 528	3 080	2 966	19 670
13	Inventario neto	432	152	46	34	-66	0	nd
14	Costo de almacenaje	2 160	760	230	170	0	0	3 320
15	Costo de órdenes atrasadas	0	0	0	0	990	0	990
16	Costo total	99 270	91960	117 950	106010	97 590	92 400	605 180

Salarios y beneficios = $120/trabaj ador/día
Costo de despido = $600/trabajador Costo
de orden atrasada = $15/unidad/mes

Producción = cuatro unidades/trabajador/día
Costo de contratación = $450/trabajador
Costo de almacenaje = $5/unidad/mes

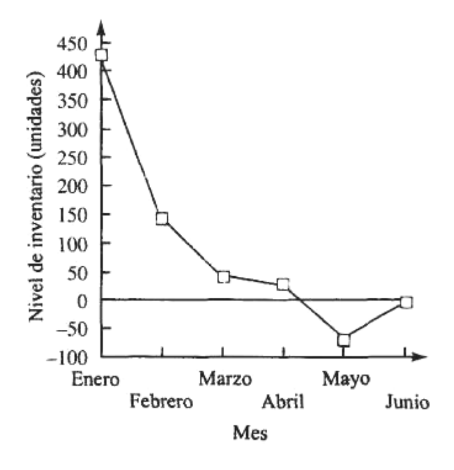
tario neto se muestra en la figura 5-4. Esta gráfica está siempre arrriba de cero, lo que indica que no se permiten faltantes.

5.3 Planes mixtos

Hasta ahora sólo se han considerado estrategias puras. Por lo general, los planes mixtos que permiten inventarios, órdenes atrasadas y fuerza de trabajo variable son superiores a las estrategias puras.

La tabla 5-6 describe un ejemplo de un plan mixto. El número de trabajadores usado en este plan es una estimación basada en los planes de inventario cero y fuerza de trabajo revelada. El plan de inventario cero despedía dos trabajadores en enero y contrataba nueve en febrero. En lugar de despedir trabajadores al principio, se contratan tres, lo que da un total de 38 trabajadores en enero. Al igual que en el plan de fuerza de trabajo nivelada, el inventario satisface la demanda de meses posteriores. En marzo, se contratan otros cuatro empleados para cubrir el incremento de la demanda en marzo y abril. En mayo se despiden siete por la reducción en la demanda de mayo y junio. La gráfica del inventario neto en el lado izquierdo de la figura 5-5 muestra que la producción se acerca más a la demanda que los planes nivelados. En el lado derecho de la figura 5-5 se ve que el cambio en la fuerza de trabajo es menos drástico que en el plan de inventario cero. El costo del plan mixto es de $605 180, y termina con 3 5 trabajadores y sin inventarios. Observe que este plan permite faltantes; despedir a seis trabajadores en mayo eliminaría estos faltantes pero aumentaría el costo.

Con la hoja de cálculo, es sencillo cambiar el número de trabajadores para determinar el costo de los diferentes planes. Sin embargo, encontrar el plan menos costoso por prueba y error estará sujeto tanto a la suerte, como a la cantidad de tiempo disponible para generar planes alternativos.



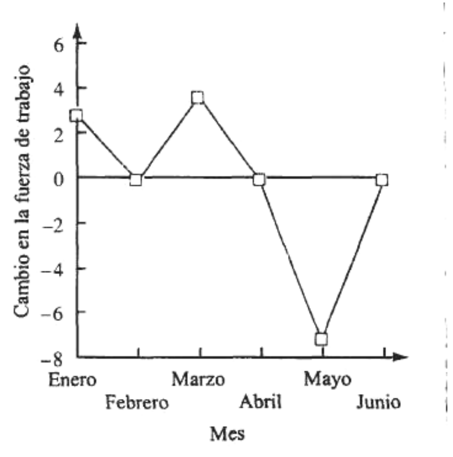


FIGURA 5-5
Producción y demanda para un plan mixto

TABLA 5-7
Comparación de los cuatro planes

	Inventario cero	Nivel/faltantes	Nivel/sin faltantes	Mixto
Costo de contratación	4 950	1 800	2 250	3 150
Costo de despido	7 800	0	0	4 200
Costo de mano de obra	59 856	603 720	619 200	593 520
Costo de almacenaje	0	4 160	6 350	3 890
Costo por faltantes	0	7 110	0	990
Costo total	611 310	616 790	627 800	605 750
Trabajadores	33	39	40	35

5.4 Comparación de planes

Hasta ahora, se han examinado cuatro planes: inventario cero, fuerza de trabajo constante con faltantes, fuerza de trabajo constante sin faltantes y un plan mixto. La tabla 5-7 da información sobre el costo y los empleados para cada uno. El plan mixto es el menos costoso y lo más probable es que sea el preferido. Sin embargo, otros planes terminan con niveles de empleados distintos, por lo que la demanda anticipada más adelante puede afectar el plan que se elija. Si se tiene el nivel de fuerza de trabajo deseado al final de junio, se puede agregar el costo de ajustar el número de trabajadores en cada plan al costo total. Para obtener 40 trabajadores para julio, se deberá contratar siete, uno, cero o cinco para los cuatro planes, respectivamente.

Los cambios en los niveles de mano de obra pueden dificultar la contratación. Pueden ser aceptables costos más altos a cambio de empleo estable. Además, para un horizonte dinámico, el término del horizonte puede no tener un gran efecto sobre las decisiones para el periodo.

5.5 Resumen de los métodos con hoja de cálculo

Los métodos con hoja de cálculo son bastante útiles porque pueden considerar otros factores; es sencillo aumentar renglones para representar el tiempo extra o la subcontratación. La mayor desventaja de la hoja de cálculo es que son métodos de prueba y error. Así, la calidad del plan depende de la creatividad de la persona que usa la hoja de cálculo. La ventaja es que quien planea puede ver de inmediato el impacto del plan y cambiarlo fácilmente.

Una alternativa de los enfoques de prueba y error con una hoja de cálculo es usar programación lineal. De hecho, muchas hojas de cálculo tienen anexos de programación lineal para que la hoja establezca los datos para el modelo. Estos métodos determinan un plan de costo mínimo. Para problemas grandes, se usan programas especializados para la solución de programación lineal en lugar de las hojas de cálculo.

SECCIÓN 5 EJERCICIOS

5.6. Mencione y explique las tres estrategias básicas en la planeación agregada.

5.7. ¿Cuáles son las ventajas de un plan de producción con base en una hoja de cálculo? ¿Cuáles son las desventajas?

5.8. Considere el siguiente plan de producción:

Mes	Inventario inicial	Demanda	Producción requerida	Número de trabajadores	ɔducción real
Enero	200	500	300 7	15	660
Febrero	360	600	7	15	660
Marzo	7	650		15	660

a) ¿Cuántas unidades produce cada trabajador?
b) ¿Cuántas unidades deben producirse en febrero si no se permiten faltantes?
c) ¿Cuál es el inventario inicial para marzo para el plan dado?
d) ¿Cuál es el costo total del inventario en que se incurre con este plan, si cuesta $12 por año al macenar una unidad?
é) ¿Cómo llamaría a este plan?
f) ¿Es óptimo? Explique.

5.9. Poseidon Meter, Inc. fabrica una variedad de medidores de agua. Los datos del año pasado indican que un trabajador puede hacer, en promedio, 100 medidores por periodo de seis semanas- El costo de almacenaje se calcula en $1 por medidor por periodo. Las órdenes atrasadas, si se permiten, cuestan cerca de $2 por medidor por periodo. Se pueden contratar nuevos trabajadores a un costo de $1000 por trabajador; los trabajadores existentes se pueden despedir a un costo dej $2000 por trabajador. Los trabajadores ganan $1500 por periodo. Actualmente, Poseidon cuenta bon 10 empleados. El pronóstico para los siguientes cuatro periodos es 1200,1200,1000 y 1000 medidores, respectivamente.

á) Desarrolle un plan de inventario cero para los siguientes cuatro periodos.
b) Desarrolle un plan de fuerza de trabajo constante (sin faltantes) para los siguientes cuatro pe riodos.
c) Desarrolle un plan de fuerza de trabajo constante (permitiendo a lo más 50 órdenes atrasadas) para los siguientes cuatro periodos.
d) ¿Qué plan recomendaría y por qué?

5.10. X-Print Manufacturing produce impresoras laser. Una planta ensambla el modelo PL-4000. Los estándares indican que un trabajador puede ensamblar cinco impresoras al día. El costo de fabricar este modelo es $350 y la compañía piensa que cuesta $5 almacenar una impresora durante un mes. Los trabajadores ganan $1500 al mes y se pueden contratar por $500 cada uno; el costo por despido es $750 por trabajador. Por ahora se tienen 12 trabajadores en el departamento de ensamble. Un faltante de impresoras tiene un costo de $35 por unidad por mes.

Mes	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
Días hábiles	21	22	21	23	19	20	126
Demanda	1020	950	800	1000	1250	650	5670

a) Desarrolle un plan de inventario cero para este problema.
b) Desarrolle un plan de fuerza de trabajo constante cuando no se permiten faltantes.
c) Como este plan no toma en cuenta los faltantes, su jefe le pide que desarrolle un plan de fuerza de trabajo constante que permita órdenes atrasadas. ¿Qué plan es el mejor?
d) Debido a un plan de capacidad a largo plazo, se relocalizará el departamento de ensamble, lo que requiere que el departamento pare. Existen dos tiempos posibles para que esto ocurra. Uno es parar cuatro días en octubre y el otro necesitará ocho días en diciembre. ¿Qué plan re comendaría?

5.11. Jerry es gerente de producción en la compañía ProtoPlastics. Los dos artículos importantes que hace son portaespejos y manijas. La demanda histórica mensual para los dos últimos años se muestra en la tabla. Recientemente, Proto lo contrató a usted y Jerry le ha pedido que planee la producción para el año próximo. Se necesitan dos días-trabajador para hacer un portaespejo y tres para hacer una manija. Se cuenta con 32 trabajadores en la planta. El costo al contratar a un nuevo trabajador es $700, y al despedir uno existente es $1000. Los trabajadores ganan $2000 al mes. Hacer un portaespejo cuesta $250, y una manija $380. La tasa del costo de mantener un inventario para Proto es 36% anual. No se permiten faltantes. Desarrolle un plan de producción agregado mensual y los niveles de fuerza de trabajo para los meses 25 al 30.

Año 1			Año 2		
Mes	**Portaespejo**	**Manija**	**Mes**	**Portaespejo**	**Manija**
1	101	200	13	102	222
2	97	197	14	102	220
3	94	196	15	97	225
4	102	200	16	110	222
5	101	202	17	92	227
6	92	209	18	102	228
7	97	207	19	110	232
8	91	216	20	92	234
9	103	212	21	102	242
10	92	220	22	107	236
11	97	216	23	103	241
12	91	218	24	91	239

5.12. La compañía SkAtZ ha pronosticado la demanda de patines como 56, 84,108 y 59 miles de cajas para los siguientes cuatro trimestres. Existe un inventario inicial de 20 000 cajas y cuesta $50 al mes almacenar una caja en inventario. Los clientes aceptarán una orden atrasada, pero hay un costo de $250 por caja, por la pérdida de la buena voluntad del cliente. La capacidad de producción y los costos son los siguientes:

Periodo	1	2	3	4
Capacidad interna (1000 cajas)	60	70	60	55
Capacidad de subcontratación (1000 cajas)	40	40	40	40
Costos internos ($100/caja)	20	21	23	22
Costos de subcontratación ($100/caja)	22	28	30	28

Usando una hoja de cálculo, determine un plan de producción agregado factible para el próximo año. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de su plan?

5.13. Eastern Electric fabrica lavadoras y secadoras. Los requerimientos de producción para las unidades agregadas están dados en la tabla. Un empleado puede producir 20 unidades al mes en tiempo de trabajo normal, y puede producir dos unidades adicionales en tiempo extra. En este momento, se tienen 25 empleados y no se usa tiempo extra. Se pueden contratar nuevos trabajadores, pero hay un costo de $950 por empleado; los costos de despido son de $1500 por empleado. El salario de tiempo normal es $1750 mensuales por empleado, con costos de tiempo extra de $180 por unidad por empleado. Los costos de mantener inventario son $ 15 al mes por unidad y los costos por faltantes son $30 al mes por unidad. No se tiene inventario inicial. Desarrolle un plan agregado para los siguientes cinco meses.

Mes	1	2	3	4	5
Demanda	450	550	600	625	675

6 ENFOQUES DE PROGRAMACIÓN LINEAL PARA LA PLANEACIÓN AGREGADA

La programación lineal es adecuada para determinar el mejor plan agregado. Hanssmann y Hess (1960) fueron los primeros en formular la planeación agregada como un modelo de programación lineal. Para formalizar el modelo de planeación de la sección anterior, debe introducirse la notación. Se definen los parámetros del problema como

T = longitud del horizonte de planeación, en periodos
t = índice de periodos, t = 1,2,... ,T
D_t = pronóstico del número de unidades demandadas en el periodo t n_t =
número de unidades que puede hacer un trabajador en el periodo t
Cf = costo de producir una unidad en el periodo t
Cf = costo de un trabajador en el periodo t
C'' - costo de contratar un trabajador en el periodo t C^L_t - costo de
despedir un trabajador en el periodo t $C\backslash$ = costo de mantener una unidad
en inventario durante el periodo t Cf = costo del faltante de una unidad
durante el periodo t

De nuevo, las variables de decisión son la cantidad a producir, el número de trabajadores que deben contratarse o despedirse, y los niveles de inventario y faltantes. Formalmente, se tiene

P_t = número de unidades producidas en el periodo t
W_t = número de trabajadores disponibles en el periodo t
H_t = número de trabajadores contratados en el periodo t
L_t = número de trabajadores despedidos en el periodo t
/, = número de unidades en inventario al final del periodo t
B_t = número de unidades faltantes al final del periodo t

Recuerde que la programación lineal supone que todas las variables son continuamente divisibles. Así, la solución puede ser producir 2142.3 unidades el próximo mes. Aunque puede ser imposible producir 0.3 unidades, las unidades agregadas son ficticias, así que tal vez no sea importante. Por otro lado, redondear números grandes puede ser aceptable. Sin embargo, si la solución es contratar 1.5 trabajadores, puede tenerse un problema. Con frecuencia se pueden obtener resultados satisfactorios redondeando y usando el sentido común. De otra manera, se puede usar un paquete de programación entera, desafortunadamente estos paquetes son mucho más difíciles de resolver y, por lo tanto, limitan el tamaño de los problemas que tienen solución.

6.1 Restricciones

Se definen varias restricciones para el modelo de programación lineal: las restricciones sobre capacidad, fuerza de trabajo y materiales. Estas restricciones relacionan entre sí las variables de decisión a través de los parámetros.

Primero, el tamaño de la fuerza de trabajo limita el número de unidades que se pueden producir. En el periodo t se tienen W_t trabajadores, y cada uno puede producir n, unidades en el periodo, lo que significa que no se pueden producir más de n, W_t unidades en el periodo t. Matemáticamente se tiene

$$P_t \leq n_t W_t \qquad t = 1, 2, \ldots, T$$

El número de trabajadores disponibles es una función del número con el que se inicia y cuántos se contratan o despiden. Sea W_o el número inicial de trabajadores. Para periodos posteriores se tiene

$$W_t = W_{t-1} + H_t - L_t \qquad t = 1, 2, \ldots, T$$

Por último, las unidades producidas se relacionan con el inventario neto:

Inventario neto de este periodo = inventario neto del periodo pasado
+ producción de este periodo - demanda de este periodo

Si el inventario neto es positivo, se tiene un inventario físico, pero si es negativo, la posición es de órdenes atrasadas. Estas dos condiciones no pueden ocurrir al mismo tiempo. Sea /, - B, el inventario neto en el tiempo t. Ya sea que /, > 0 o bien B_t > 0, pero al menos una de ellas debe ser cero. La relación, llamada ecuación de balance de material o inventario, es

$$I_t - B_t = I_{t-1} - B_{t-1} + P_t - D_t \qquad t = 1, 2, \ldots, T$$

donde $/_0$ y B_o son el inventario inicial y las órdenes atrasadas, respectivamente.

6.2 Costos

El costo para cualquiera de los planes es la suma de los costos de producción, contratación y despido, costos de almacenaje y órdenes atrasadas para todos los periodos. Los costos de producción son simplemente el número de unidades producidas mutliplicado por el costo unitario para producirlas y el costo por trabajador por el número de trabajadores. Los costos de producción por unidad que no cambian de un periodo a otro se pueden eliminar del modelo. El costo total para un plan es

$$\sum_{t=1}^{T} (C_t^P P_t + C_t^W W_t + C_t^H H_t + C_t^L L_t + C_t^I I_t + C_t^B B_t)$$

6.3 Un modelo

Ahora se tiene todo lo necesario para establecer un modelo de programación lineal. Éste es

$$\text{Minimizar} \sum_{t=1}^{T} (C_t^P P_t + C_t^W W_t + C_t^H H_t + C_t^L L_t + C_t^I I_t + C_t^B B_t)$$

sujeta a

$$P_t \leq n_t W_t \qquad t = 1, 2, \ldots, T$$

$$W_t = W_{t-1} + H_t - L_t \qquad t = 1, 2, \ldots, T$$

$$I_t - B_t = I_{t-1} - B_{t-1} + P_t - D_t \qquad t = 1, 2, \ldots, T$$

$$P_t, W_t, H_t, L_t, I_t \geq 0 \qquad t = 1, 2, \ldots, T$$

6.4 Un problema como ejemplo

Considere el ejemplo de Precisión Transfer en la sección 5.5. El horizonte de planeacióii es seis periodos, así, T = 6. Los costos no varían con el tiempo: C^p_t = 0,Cf = $120n, ,*C"* =▪▪ $450, *Cf* = $600 y *C* = $5. Se supone que no se permiten faltantes, por lo que se elimina es :e costo y las variables. De nuevo, como los costos de producción no cambian en todo el horizonte, no se incluyen. La demanda se presenta en la tabla 5-1 y ya se calcularon el número de uaidades mensuales que puede fabricar un trabajador. Las ecuaciones de programación lineal para este problema se muestran en la tabla 5-8.

Usando un paquete de programación lineal, se obtuvo la solución óptima después de 28 iteraciones. El costo total es $600 191 y los valores de las variables se dan en la tabla 5-9.

TABLA 5-8
Modelo de programación lineal para Precision Transfer

Minimizar	$2520W_1 + 2400W_2 + 2760W_3 + 2520W_4 + 2640W_5 + 2640W_6$
	$+ 450H_1 + 450H_2 + 450H_3 + 450H_4 + 450H_5 + 450H_6$
	$+ 600L_1 + 600L_2 + 600L_3 + 600L_4 + 600L_5 + 600L_6$
	$+ 5I_1 + 5I_2 + 5I_3 + 5I_4 + 5I_5 + 5I_6$
Sujeta a	
	$P_1 \leq 84W_1$
Restricciones de capacidad de producción	$P_2 \leq 80W_2$
	$P_3 \leq 92W_3$
	$P_4 \leq 84W_4$
	$P_5 \leq 88W_5$
	$P_6 \leq 88W_6$
	$W_1 = 35 + H_1 - L_1$
Restricciones de fuerza de trabajo	$W_2 = W_1 + H_2 - L_2$
	$W_3 = W_2 + H_3 - L_3$
	$W_4 = W_3 + H_4 - L_4$
	$W_5 = W_4 + H_5 - L_5$
	$W_6 = W_5 + H_6 - L_6$
	$I_1 = \quad + P_1 - 2760$
Restricciones de inventario-balance	$I_2 = I_1 + P_2 - 3320$
	$I_3 = I_2 + P_3 - 3970$
	$I_4 = I_3 + P_4 - 3540$
	$I_5 = I_4 + P_5 - 3180$
	$I_6 = I_5 + P_6 - 2900$
	$P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6,$
	$H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6, L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6,$
	$I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6 \geq 0.$

TABLA 5-9
Solución de programación lineal

Mes	Producción	Inventario	Contratación	Despido	Trabajadores
Enero	2940.00	180.00	0.00	0.00	35.00
Febrero	3232.86	92.86	5.41	0.00	40.41
Marzo	3877.14	0.00	1.73	0.00	42.14
Abril	3540.00	0.00	0.00	0.00	42.14
Mayo	3180.00	0.00	0.00	6.00	36.14
Junio	2900.00	0.00	0.00	3.18	32.95
Costo total	= $600191.60				

Recuerde las suposiciones básicas de programación lineal: las variables son lineales y continuamente divisibles. Así, la solución de programación lineal produce 3232.86 engranes, almacena 92.86 engranes y contrata 5.41 trabajadores para tener 40.41 empleados en febrero. Debido a que los *engranes* en el modelo están agregados y no representan los engranes reales, la producción fraccional y las cifras de inventario no deben preocupar. Además, 0.86 engranes en 3232 es una cantidad minúscula y no es problema. Sin embargo, 5.41 trabajadores contratados es otro asunto. Si se pueden contratar trabajadores de tiempo parcial, la fracción no es importante; pero como se supuso que sólo se disponía de trabajadores de tiempo completo, debe ajustarse la solución. Aunque el modelo de programación lineal no proporciona el óptimo del problema real, sí ofrece una visión de lo que es una buena solución.

La solución de programación lineal produce a toda la capacidad en los tres primeros meses. En febrero se contratan 5.41 trabajadores. Como debe contratarse a seis, se tiene una capacidad excedente de 0.6 mes-trabajador, lo que cubre la capacidad necesaria para marzo y los siguientes meses. Se usa una hoja de cálculo (tabla 5-10) con 35 trabajadores en enero, 41 en febrero y 42 en marzo y abril. En mayo se disminuye a 36 y en junio a 33. La capacidad de febrero, marzo, abril y mayo es de 170 unidades menos que la demanda en esos meses. Para evitar los faltantes, estas unidades deben producirse en enero. Hay un exceso de capacidad de 180 unidades en enero, con lo que, de hecho, se pueden evitar los faltantes. Usando estos números se determina la producción para cada mes. Pudo haber sido necesario cambiar el número de trabajadores para obtener un plan factible.

Usando la hoja de cálculo con los trabajadores y niveles de producción de la tabla 5-10, el plan redondeado tiene un costo total de $600 750 en lugar de los $600 191.60 de la solución de

TABLA 5-10
Redondeo de la solución de programación lineal

		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Total
1	Unidades/trabajador	**84**	80	92	84	88	88	516
2	Trabajadores	35	41	42	42	36	33	229
3	Capacidad	2940	3280	3864	3528	3168	2904	19 684
4	Demanda	2760	3320	3970	3540	3180	2900	19 670
5	Capacidad - demanda	180	-40	-106	-12	-12	4	14
6	Diferencia acumulada	180	140	34	22	10	14	14
7	Producción	2930	3280	3864	3528	3168	2900	19 670
8	**Inventario neto**	170	130	24	24	0	0	336

programación lineal. El costo del plan redondeado es entonces 0.09% más alto que el ce la solución de programación lineal. No podría obtenerse una solución mucho mejor que ésta.

Además de proporcionar una buena solución para comenzar, la programación lineal puede especificar las condiciones finales. Suponga que se quieren 36 trabajadores y 100 unidades en inventario al final de junio. Haciendo W_6 = 36y 7_6 = 100y resolviendo el programa lineal se obtiene el mejor plan que satisfaga esas condiciones.

Otra ventaja de programación lineal es el uso de la información de las variables duales (o precios sombra). Para la restricción de capacidad en enero, la variable dual es 25. Si pudiera hacerse un engrane más en enero, podrían ahorrarse $25.00. Lleva alrededor de dos horas (fabricar un engrane y un trabajador gana $15 por hora. Entonces, aun en horas normales costaría $30, más que la mejora de $25 en el costo total, de manera que las horas extra no ayudan. Los precios sombra para otras restricciones se interpretan de una manera parecida.

La información sobre costos reducidos también puede ser valiosa. Para 7_3, el costo reducido es $2.98. Siempre que el costo de almacenar en marzo sea al menos $2.02 ($5.00 - $2.98), no debe tenerse inventario. Incluso si el costo de inventario en marzo se reduce un poco, la solución permanecerá igual. Otros costos se pueden validar usando los costos reducidos, o se puede llevar a cabo un análisis formal de sensibilidad y rangos.

6.5 Aspectos prácticos sobre el uso de programación lineal

Es fácil resolver problemas grandes de programación lineal. Algunos modelos de planeación de la producción con 100 000 variables y 40 000 restricciones se resuelven semanalmente. Las grandes corporaciones, como AT&T y Delta Airlines, resuelven problemas con varios millones de variables. La solución de problemas a gran escala requiere más esfuerzo en 14 generación de los datos. Algunos programas de computadora llamados generadores de matrices extraen los datos pertinentes de una base de datos y generan el problema de programación lineal. Una vez resuelto el problema, un generador de informes convierte la salida en un formato que pueden usar quienes planean la producción y los gerentes. El desarrollo continuo en programación lineal, lenguajes para modelado y tecnología de datos hará que se puedan resolver problemas aún más grandes. Por lo tanto, los modelos de programación lineal jugarán un papel importante en la planeación de la producción en el futuro.

6.6 Extensiones

Se pueden agregar otras restricciones al problema de programación lineal para obtener un modelo más realista. Se presentarán algunas modificaciones sencillas.

Cotas directas. Si existe una limitación de espacio, se impone un límite superior, digamos l^{v}_{t} , sobre el número de unidades en inventario durante el periodo *t*. Esto se hace agregando la restricción

$$I_t \leq I_t^U$$

También pueden incluirse cotas inferiores. La política de administración puede imponer límites en la contratación o el despido de trabajadores, lo cual se puede manejar en forma parecida. Las condiciones terminales se pueden manejar mediante cotas. Por ejemplo, para imponer inventarios finales mínimos y máximos se agrega

$$I_T^L \leq I_T \leq I_T^U$$

Estableciendo $B_T = 0$ se asegura que no ocurran faltantes importantes al final del horizonte. Las restricciones de este tipo se llaman cotas variables. Al agregarlas no se tienen muchas más dificultades en la solución del modelo de programación lineal, porque se manejan de manera implícita.

Cotas porcentuales. En lugar de dar un número específico como límite sobre una variable, la cota puede ser un porcentaje de otra variable. Suponga que la administración impone la restricción de no despedir a más del 5% de la fuerza de trabajo en cualquier periodo. Matemáticamente esto es

$$L_t \leq .05W_t$$

Restringir los faltantes a un porcentaje específico de la producción proporciona otro ejemplo. Estas restricciones se llaman cotas superiores variables. Aunque son más complejas que las restricciones de cotas variables, significan una carga computacional menos pesada que las restricciones que contienen más de dos variables.

Capacitación. Si debe capacitarse a los trabajadores antes de que sean productivos, se pueden cambiar las restricciones de la fuerza de trabajo para que reflejen el periodo de entrenamiento. Si un trabajador contratado en el periodo t se capacita durante un periodo, el trabajador no es productivo hasta el periodo $t + 1$. Se sustituyó H_{t-l} *en* lugar de H, para modificar la ecuación de balance de la fuerza de trabajo. La ecuación es

$$W_t = W_{t-1} + H_{t-1} - L_t$$

Si se paga un salario diferente a los empleados en capacitación que a los normales, la componente de mano de obra de la función objetivo se cambia según esto.

Objetivos múltiples. En ocasiones es difícil determinar los costos de faltantes, contratación y despido. Como los planes que minimizan faltantes pueden contratar y despedir muchos trabajadores, puede ser adecuado un enfoque de objetivos múltiples. Masud y Hwang (1980) desarrollan un modelo de objetivos múltiples que intenta maximizar la ganancia, al mismo tiempo que minimiza los faltantes, la inversión en inventario y los cambios en la fuerza de trabajo.

SECCIÓN 6 EJERCICIOS

5.14. Examine la programación lineal para la planeación agregada. Analice las suposiciones que se re quieren y los posibles problemas asociados a ellas. ¿Cuáles son las fortalezas y debilidades del en foque de programación lineal?

5.15. Desarrolle y resuelva un programa lineal para determinar un plan óptimo para Poseidon Meter (ejercicio 5.9). Suponga que no se permiten más de 50 órdenes atrasadas en cualquier periodo. Compare este plan con la solución en la hoja de cálculo.

5.16. Considere la X-Print Manufacturing (ejercicio 5.10).

á) Proporcione las restricciones para el primer mes en una formulación de programación lineal para este problema. Suponga que se permiten faltantes y que sólo se permite un cambio del 25% en la fuerza de trabajo en cualquier mes.

b) Determine un plan óptimo para X-Print. Compárelo con el plan en la hoja de cálculo.

c) Debido a la cerrada competencia en el mercado de impresoras láser, X-Print quiere reexami nar su política de faltantes. ¿Qué costo por faltantes haría que el caso sin faltantes fuera mejor que el caso con faltantes?

d) ¿Responde la formulación de programación lineal la pregunta de cuándo relocalizar el departamento de ensamble? Si lo hace, ¿cómo? Si no, ¿puede modificarse para que lo haga?

5.17. Desarrolle y resuelva un modelo de programación lineal para el plan agregado de la Eastern Electric (ejercicio 5.13). Compárelo con la solución en la hoja de cálculo

5.18. Consumer Electronics produce electrodomésticos pequeños. Varios modelos de tostadores, cafe teras y procesadores de pan significan la mayor parte de la producción. La demanda de cada familia para los próximos tres meses, el número promedio que un trabajador puede fabrica producto en un mes y su costo promedio de almacenaje son los siguientes:

	Mes				**Costo de**
	1	**2**	**3**	**Salida/trabajador**	**almacenaje**
Tostador Cafetera	2000	2600	2000	70	$0.85
Procesador de pan	2200	2400	2100	120	$1.25
Total	900	1200	700	110	$2.10
	5100	6200	4800		

Todos los trabajadores ganan $2000 al mes. Contratar un nuevo trabajador cuesta $120(1 y despedir uno $2500. Un nuevo trabajador tiene un mes de capacitación práctica, durante la cual sólo produce la mitad de lo normal para un trabajador capacitado. Por razones de estabilidad, Consumer Electronics no quiere cambios en más del 15% de su fuerza de trabajo en cualquier mes; por ahora se cuenta con 55 trabajadores. No se permiten faltantes. Desarrolle y resuelva un modelo para determinar un plan de producción agregada para Consumer Electronics.

7 MODELOS DE TRANSPORTE

Un problema de planeación de la producción con fuerza de trabajo constante se puede resolver como un problema de transporte (Bowman, 1956). Los algoritmos de transporte son alrededor de 100 veces más rápidos que los de programación lineal, y los problemas grandes se resuelven fácilmente. Un problema de transporte minimiza el costo de envío de un solo producto desde varias plantas a varios clientes. Las plantas son puntos de abastecimiento con una disponibilidad dada, mientras que los clientes son puntos de demanda que requieren cierta cantidad de productos. Existe un costo al enviar una unidad de producto de cada punto de abastecimiento a cada punto de demanda, y el abastecimiento total debe ser igual a la demanda total. S i es necesario, se puede añadir un punto de abastecimiento o uno de demanda ficticios.

Suponga que se considera sólo la producción en horas normales con la posibilidad de irjan tener un inventario. Se establece

n,W_t = la capacidad (en unidades) durante el periodo *t* D_t = número pronosticado de unidades demandadas en el periodo *t* Cf = costo de producir una unidad en el periodo *t* *C*\ = costo de mantener una unidad en inventario durante el periodo /

Para que existan soluciones factibles, suponga que la capacidad total sobre el horizonte es al menos tan grande como la demanda total.

7.1 Modelo de planeación de la producción

El problema de transporte tiene un punto de abastecimiento (renglón) para cada periodo. Si existe un inventario inicial, éste es otro punto de abastecimiento. Tiene un punto de demanda (columna) para cada periodo, además de otro para el inventario final si se requiere. Por último, se añade un punto de demanda para el exceso de capacidad. Un problema con *T* periodos tiene *T + í* renglones y *T + 2* columnas. Para cada renglón se da la capacidad para ese periodo y cada columna tiene una demanda. Para la columna de exceso de capacidad, la demanda es la diferencia entre la capacidad total y la demanda total.

TABLA 5-11
Datos del problema de Klean

t	1	2	3
$n_t W_t$	350	300	350
D_t	200	300	400
C_t^P	10	11	12
C_t^I	2	2	2

Cada celda en la matriz de transporte tiene un costo. El costo de una unidad fabricada en el periodo *t* y usada para satisfacer la demanda en el periodo *t* es justo el costo de producción C^p. El costo de una unidad producida en el periodo *t* y demandada en el periodo *t* + 1 es C^p + C,. Una unidad producida en el periodo / y usada dos periodos después tiene un costo de C^p + C\ + C^i_{l+V} Otros costos se calculan de manera parecida. Como no se permiten faltantes, la demanda en el periodo *t* no puede cumplirse con unidades producidas en periodos posteriores; estas celdas tienen un costo infinito. El inventario inicial tiene un costo de cero para el primer periodo, y los periodos que siguen tienen la suma de los costos de almacenaje para todos los periodos anteriores.

Ejemplo 5-1. Un plan de producción para Klean, Inc. Klean, Inc. necesita planear la producción para los próximos tres meses. La demanda esperada del desengrasador es 200,300 y 400 cajas en los tres periodos siguientes. Existe un inventario inicial de 50 cajas y se desea un inventario final de 75 cajas. La capacidad para los próximos tres meses es 350,300 y 350 cajas. La capacidad total es 1000 cajas; al sumar las 50 cajas del inventario inicial se tienen 1050 cajas disponibles en el horizonte. La demanda total es de 900 cajas, pero se debe sumar el inventario final para obtener una demanda de 975 cajas. El exceso de capacidad es 75 cajas. La proyección de Klean dice que cuesta $ 1000, $1100 y $1200 producir una caja en los próximos tres meses. Debido a la naturaleza volátil del desengrasador, cuesta $200 al mes almacenar una caja. Los datos con los costos expresados en múltiplos de $100 se resumen en la tabla 5-11.

Solución. En la tabla 5-12 se muestra la tabla de transporte y la solución óptima para este problema. El costo de producir una caja en el periodo 1 y usarla para satisfacer la demanda en el periodo 1 es 10, y está dado en la esquina superior de la celda (1,1). Producir una caja en el periodo 1 y venderla en el periodo 2 cuesta 10 por hacerla y 2 por almacenarla, entonces el costo de la celda (1,2) es 12. Las demandas y disponibilidades están dadas en las columnas y renglones respectivos. Como no se permiten faltantes, no hay costo por satisfacer la demanda de un periodo con la producción de un periodo posterior, por ejemplo, celda (3,1).

La solución óptima está representada en negritas en la tabla. Se producen 275 cajas en el periodo 1; se venden 150 cajas en el periodo 1,50 en el periodo 3 y el resto forma el inventario final. El costo total de este plan es $ 1 150 000. Al igual que con programación lineal, los precios sombra y los costos reducidos pueden proporcionar un mayor conocimiento del problema.

TABLA 5-12

	1	2	3	Inventario final	Capacidad en exceso	Capacidad disponible
Inventario inicial	0 / **50**	2	4	6	0	50
Periodo 1	10 / **150**	12	14 / **50**	16 / **75**	0 / **75**	350
Periodo 2	—	11 / **300**	13	15	0	300
Periodo 3	—	—	12 / **350**	14	0	350
Demanda	200	300	400	75	75	1050

Subcontratación y tiempo extra. Si se dispone de otros modos de obtener productos), pueden estar incluidos en el modelo de transporte. Dos alternativas comunes son producir *ep.* tiempo extra y subcontratar. Suponga que pueden hacerse 90 unidades en tiempo extra en el periodo 1, a un costo de $16 por caja. Se añade un renglón con abastecimiento de 90 y costos iguales al costo del tiempo extra más los costos de almacenaje pertinentes. La misma idea modela la subcontratación.

Faltantes. Suponga que se aceptan órdenes atrasadas a un costo de $5 por mes-unidad. Entonces la producción en el periodo 2 se puede usar para satisfacer la demanda del periodo 1. El costo de producir en el periodo 2 es $11, entonces sumando el costo de faltantes de $5 se obtiene un costo de $16 para la celda (2,1). De la misma manera, el costo para la celda (3,2) es 12 + 5 = 17 y para la celda (3,1) es 12 + 5 + 5 = $22. Es sencillo construir el modelo apropiado.

Suponga que los costos de tiempo extra por unidad son $ 16, $ 18 y $20 para los periodos 1, 2 y 3, con capacidades de tiempo extra de 90,90 y 75 unidades en los tres periodos, respectivamente. Si la demanda en el periodo 1 es 400 unidades y los demás parámetros quedan igual, la tabla de transporte y la solución óptima se dan en la tabla 5-13. La solución óptima usa tiempo extra en el periodo 1 y tiene un costo total de $ 1 370 000. Utiliza tiempo extra en los periodos 1 y 3 en lugar de mantener inventario. No hay faltantes, pero con costos diferentes podía haber. Como se cambiaron los parámetros, este plan no se puede comparar al del ejemplo de Klean.

5.19. Goode Foods desea planear la producción agregada en una sola planta para los próximos tres periodos. Una unidad agregada es 1000 galones (k-gals) de alimento procesado. Se dan los siguientes datos:

TABLA 5-13
Un modelo de transporte con tiempo extra

(En cada celda: costo unitario / cantidad asignada)

		1	2	3	Inventario final	Capacidad en exceso	Capacidad disponible
Inventario inicial		0	2 / **25**	4 / **25**	6	0	50
Periodo 1	Tiempo normal	10 / **350**	12	14	16	0	350
	Tiempo extra	16 / **50**	18	20	22	0 / **40**	90
Periodo 2	Tiempo normal	16	11 / **275**	13	15 / **75**	0	350
	Tiempo extra	23	18	20	22	0 / **90**	90
Periodo 3	Tiempo normal	22	17	12 / **300**	14	0	300
	Tiempo extra	30	25	20 / **75**	22	0	75
Demanda		400	300	400	75	130	1305

Periodo				
Capacidad de producción (k-gals)	Tiempo normal	10	10	80
	Tiempo extra	0	0	10
	Subcontratación	20	20	40
Costos de producción ($1000/k-gal)		40	40	
	Tiempo normal			2.0
	Tiempo extra	**2.0**	2.0	2.8
	Subcontratación	**2.8**	2.8	3.2
Demanda (k-gals)		**3.2**	3.2	95
		95	105	

Existe un inventario inicial de 5000 galones. El costo de mantener 1000 galones en inventario durante un periodo es $60. Suponiendo que debe satisfacerse toda la demanda, formule y resuelva un modelo que minimice el costo total y que satisfaga todas las restricciones.

5.20. Desarrolle y resuelva un modelo para el problema de planeación de la compañía SkAtZ (ejercicio 5.12). Compárelo con la solución en hoja de cálculo. ¿Cuáles son las desventajas, si las tiene?

5.21. Generic, Inc. produce varios medicamentos genéricos que vende a cadenas de farmacias. Todos los medicamentos están en forma de tabletas y se hacen en la misma línea de producción. Ahora, la planta opera dos turnos al día, cinco días a la semana y la demanda para los siguientes cuatro

meses es 420,350,410 y 315 millones de tabletas. Cada tumo puede producir 200 millones de tabletas al mes a un costo de $0.50 por tableta. Se pueden usar horas extra para producir tabletas a un 65% más caras. Sólo se pueden usar dos horas de tiempo extra debido a que debe realizarse maritenimiento en el equipo de producción. El inventario actual es dos millones de tabletas y Generic quiere tres millones en inventario al final del mes 4. Cuesta $15 000 mantener un millón de tabletas en inventario durante un mes. Como las farmacias ordenan para sus centros de distribución, la mayor parte de las órdenes pueden surtirse atrasadas. Los contratos especifican una penalización del 30% por la entrega tardía. Desarrolle un plan de producción agregada óptimo para los próximos cuatro meses.

5.22. Suponga que Generic (ejercicio 5.21) puede modificar su línea de producción para obtener un 15% de aumento en la capacidad. ¿Cuánto dinero pueden pagar por la mejora para recuperar el costo en un año? Enumere las suposiciones que hizo para contestar esta pregunta.

8 PLANES DESAGREGADOS

Un plan agregado determina los niveles de producción e inventario para unidades agregadas en cada periodo. En realidad, las unidades agregadas no se producen, por lo que el plan debe considerar productos individuales. Este proceso se llama desagregación y se convierte en el plan maestro de producción.

En ocasiones el plan maestro de producción no depende del plan agregado, de manera que se manejan en forma independiente. Un ejemplo es una unidad agregada en dólares no relacionada con la capacidad del proceso de manufactura. Otra situación se representa por distintos productos que comparten muy pocas o ninguna máquina o proceso. Los productos j complementarios, por ejemplo, motos de nieve y acuamotos, tienen un plan agregado con muy poca relación con el plan maestro. Algunos periodos están dedicados exclusivamente a un producto porque hay muy poca o ninguna demanda para el otro. Aun cuando los productos no sean complementarios, si la demanda de uno domina en un periodo dado, se produce en ese periodo.

Una demanda significativa para dos o más productos que comparten un proceso en el mismo periodo requiere dos decisiones: cuánto de cada producto debe fabricarse en el periodo y cuándo, dentro del periodo, debe hacerse. Esto es, qué tamaño de lote y qué secuencia deben usarse. Si la elección incluye preparación de máquinas, la solución de los problemas es mucho más compleja.

Se presentan dos enfoques al problema de la desagregación. El tiempo de agotamiento es apropiado cuando la utilización de la capacidad no es muy alta y los tiempos de preparación son pequeños. Cuando el costo o el tiempo de preparación son grandes y las restricciones de capacidad son fuertes, lo adecuado es usar modelos de programación entera.

8.1 Tiempo de agotamiento

El tiempo de agotamiento es tal vez el método más antiguo y el que más se usa para Convertir un plan agregado en planes para productos individuales. Para calcular el tiempo de agotamiento R_i para el producto i, sea

$$R_i = I_i / D_i$$

R_i es el tiempo que durará el inventario actual del producto i. Se comienza fabricando el producto con la R_T más pequeña. Después de fabricar i, se fabrica el producto con el siguiente tiem-

po de agotamiento más pequeño y se continúa con esta secuencia hasta que se fabrican todos los productos. Si los tiempos de preparación son pequeños y la capacidad es suficientemente mayor que la demanda, esta secuencia será factible.

La cantidad de cada producto fabricada en la secuencia puede afectar la factibilidad del plan. Para evitar la no factibilidad, se usa un tiempo de agotamiento agregado para determinar la cantidad de cada producto que debe fabricarse en la secuencia. El tiempo de agotamiento agregado es el número de periodos que llevará usar todo el inventario disponible más las nuevas unidades producidas durante el periodo actual (ambos en unidades agregadas), suponiendo que se usan a la tasa de demanda. Suponga que una unidad agregada está en horas-máquina y sea R' el tiempo de agotamiento agregado, entonces se tiene

$$R' = \frac{\sum_{i=1}^{n} r_i I_i + T}{\sum_{i=1}^{n} r_i D_i}$$

donde $r.$ es la tasa de producción para el producto i y se manejan n productos.

Se produce en la secuencia del tiempo de agotamiento más pequeño, pero la cantidad producida de cada unidad es una proporción del tiempo de agotamiento agregado R'. El tamaño de lote para el producto i, digamos Q_i, será

$$Q_i = R'D_i - I_i$$

8.2 Modelos de programación entera

No es difícil formular el problema desagregado como un modelo de programación entera. La forma específica dependerá del modelo agregado y de las características importantes necesarias del plan detallado. Se ilustrará con un escenario representativo.

Suponga que se fabrican n productos en L líneas o instalaciones. Tanto las instalaciones como los productos se han agregado en un plan trimestral por mes. Para cada uno de los cuatro meses siguientes se ha determinado cuánto producir en los niveles de producción agregada e inventario agregado. Se desea convertir esta información en un plan de producción semanal para productos y líneas individuales. Esto debe hacerse manteniendo el nivel de inventario sugerido por el plan agregado para suavizar la producción.

Considere el primer mes del plan agregado. Sea

i = índice de productos, i = 1,2,..., n
I - índice de líneas de producción, / = 1,2,..., L
p = índice de subperiodos en el mes, digamos semanas, p = 1,2,3,4
D_i = demanda del producto i en el mes
/' = inventario agregado deseado al final del mes
$I?$ = inventario disponible del producto i al inicio del mes
if = inventario disponible del producto i al final del mes
r_a - tasa de producción para el producto i en la línea /
k_i - factor de conversión de una unidad del producto í en un producto agregado
$c_{ü}$ - costo de producir en el mes la demanda completa del producto i en la línea /
s_{rl} = costo de preparación para el producto j en la línea / si se está produciendo i en /

Las variables de decisión son x_{ilp} (la proporción del tiempo en la semana p que se procesa el producto i en la línea /)y z_{iJlp} (una variable cero-uno; uno si el producto j sigue al i eja la línea l en la semana p). El modelo es: I

$$\text{Minimizar} \sum_{i=1}^{n} \sum_{l=1}^{L} \sum_{p=1}^{4} \left(c_{il} x_{ilp} + \sum_{j=1}^{n} s_{ijl} z_{ijlp} \right)$$

sujeta a

$$I_i^0 - I_i^E + \sum_{i=1}^{n} \sum_{l=1}^{L} \sum_{p=1}^{4} r_{il} x_{ilp} = D_i \qquad i = 1, 2, \ldots, n$$

$$\sum_{i=1}^{n} k_i I_i^E = I'$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ilp} = 1 \qquad l = 1, 2, \ldots, L; \; p = 1, 2, 3, 4$$

$$x_{il,p-1} - x_{ilp} = \sum_{q=1}^{n} z_{iqlp} - \sum_{q=1}^{n} z_{qjlp} \qquad i = 1, 2, \ldots, n; \; j = 1, 2, \ldots, n; \; l = 1, 2, \ldots, L; \; p = 1, 2, 3, 4$$

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} z_{ijlp} = 1 \qquad l = 1, 2, \ldots, L; \; p = 1, 2, 3, 4$$

$$x_{ilp} \geq 0 \qquad i = 1, 2, \ldots, n; \; l = 1, 2, \ldots, L; \; p = 1, 2, 3, 4$$

$$z_{ijlp} \in \{0, 1\} \qquad i = 1, 2, \ldots, n; \; j = 1, 2, \ldots, n; \; l = 1, 2, \ldots, L; \; p = 1, 2, 3, 4$$

La primera restricción se refiere al balance de materiales. La segunda requiere inventario al final del mes para cumplir con el plan agregado. La tercera restricción fuerza la producción de la demanda completa del mes, durante el periodo de cuatro semanas. Las siguientes dos restricciones exigen que ocurra la preparación adecuada, si se está haciendo un producto diferente en la misma línea la misma semana. Las últimas dos son las restricciones de no negati vidad sobre la proporción de tiempo que un producto se fabrica en una línea dada y la restricción binaria sobre las variables de preparación.

Es sencillo ver que aun para números relativamente pequeños de productos, líneas y periodos, el modelo que resulta puede tener un gran número de variables y restriccionesj En otros tiempos esto representa una desventaja importante de los modelos de programación entera; sin embargo, dado el avance de las computadoras y los algoritmos, ahora es un problerfta menor.

Se pueden añadir otras restricciones. Si los tiempos de preparación usan una par^e significativa de la capacidad, se puede imponer una restricción de capacidad para cada línea). Ésta sumaría el tiempo de producción de los productos fabricados en la línea esa semana a lo£ tiempos de preparación y se requeriría que no fueran mayores que el tiempo disponible en 14 línea, lo que puede ser una dificultad más en la solución del modelo.

SECCIÓN 8 EJERCICIOS

5.23. ¿Cuáles son los principales objetivos de la desagregación?
5.24. Analice las dificultades de la desagregación.
5.25. Desagregue el plan de ProtoPlastic desarrollado en el ejercicio 5.11, de manera que sea factible
producir ambos productos.

a) ¿Qué cambios fueron necesarios en el plan?
b) ¿De qué manera afectan los cambios el costo total?

5.26. Establezca un "algoritmo" para desagregar un plan agregado. Aplíquelo a Goode Foods (ejercicio
5.19).

9 MODELOS AVANZADOS DE PLANEACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

Se puede usar programación lineal para más de un producto agregado, aunque el rápido crecimiento del tamaño del modelo puede ser un problema. Si se deben planear unos cuantos productos o familias de productos, la programación lineal es efectiva.

En esta sección se examinarán los modelos para varios productos. Se comienza con una simple extensión de la fuerza de trabajo y el modelo de inventarios. Es sencillo añadir al modelo las órdenes atrasadas, el tiempo extra y la subcontratación. Después se examina un modelo con restricciones sobre los recursos que representan las capacidades en diferentes áreas de producción. También se consideran rutas alternativas para los productos. Estos modelos no son incluyentes, pero presentan una visión amplia que permite al lector reconocer aplicaciones similares. Johnson y Montgomery (1974) y Lawrence y Zanakis (1984) presentan muchos modelos matemáticos para planeación de la producción.

9.1 Productos múltiples

Se usa la misma notación que antes pero se añade el subíndice /para el producto í. Formalmente se tiene:

T = longitud del horizonte, en periodos
N = número de productos
t = índice de periodos, $t = 1, 2, \dots, T$
i = índice de productos, $i = 1, 2, \dots, N$
D_{it} = número pronosticado de unidades demandadas del producto i en el periodo t
n_{it} = número de unidades del producto i que puede hacer un trabajador en el periodo t
C_{it}^{P} = costo de producir una unidad del producto i en el periodo t
C_t^W = costo de un trabajador en el periodo t
C_t^H = costo de contratar un trabajador en el periodo t
C_t^L = costo de despedir un trabajador en el periodo t
C_{it}^I = costo de mantener una unidad del producto i en inventario durante el periodo t

Las variables de decisión son

P_{it} = número de unidades del producto *i* fabricadas en el periodo *t*
W_t = número de trabajadores disponibles en el periodo *t*
H_t = número de trabajadores contratados en el periodo *t*
L_t = número de trabajadores despedidos en el periodo *t*
I_{it} = número de unidades del producto *i* almacenados al final del periodo *t*

La formulación de programación lineal es

$$\text{Minimizar} \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{N} (C_{it}^{P} P_{it} + C_{t}^{W} W_t + C_{t}^{H} H_t + C_{t}^{L} L_t + C_{it}^{I} I_{it})$$

sujeta a

$$\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{1}{n_{it}}\right) P_{it} \le W_t \qquad t = 1, 2, \ldots, T$$

$$W_t = W_{t-1} + H_t - L_t \qquad t = 1, 2, \ldots, T$$

$$I_{it} = I_{it-1} + P_{it} - D_{it} \qquad t = 1, 2, \ldots, T; \quad i = 1, 2, \ldots, N$$

$$P_{it}, W_t, H_t, L_t, I_{it} \ge 0 \qquad t = 1, 2, \ldots, T; \quad i = 1, 2, \ldots, N$$

es similar a un modelo de planeación agregada. Sin embargo, ahora se tienen variables de producción e inventario para cada producto y para cada periodo. Además, se tienen restricciones de balance de materiales para cada producto en cada periodo. La fornjulación tiene *3T+ 2NT* variables y *2T + NT* restricciones. Un modelo con 10 productos y un horizonte de planeación de 12 periodos tendrá 276 variables y 144 restricciones. Si se aumenta el!tamaño a*N* = 100 y *T* = 12 se tendrán 2436 variables y 1224 restricciones. Estos modelos dejprogramación lineal están dentro del rango del software actual. Stadtler (1986) analiza un modelo de este tipo aplicado a un fabricante grande de productos alimenticios. Determina los niveles de producción para familias de productos en lugar de para productos individuales. El programa lineal que resulta tiene 1100 variables y 830 restricciones.

Ejemplo 5-2. Mezcla de productos para Carolina Hardwood. Carolina Hardwood produce tres tipos de mesas de comedor. Ahora tiene 50 trabajadores; se puede contratar nuevos trabajadores y se puede despedir a los que se tiene. Durante los siguientes cuatro trimestres, el costo de contratación por trabajador es 420,410,420 y 405, respectivamente. El costo de despedir un trabajador es 800, 790,790 y 800. El costo de un trabajador por trimestre es 600,620,620 y 610. El inventario inicial es 100 unidades para la mesa 1,120 unidades para la mesa 2 y 80 unidades para la mesa 3. El mimero de unidades que puede hacer un trabajador por trimestre es 200, 220, 210 y 200 para la mes¿ 1; 300, 310,300 y 290 para la mesa 2 y 260,255,250 y 265 para la mesa 3. La demanda pronosticada, el costo unitario y el costo de almacenar por unidad son

	Demanda			Costo unitario			Costo de almacenar		
Trimestre	**Mesa 1**	**Mesa 2**	**Mesa 3**	**Mesa 1**	**Mesa 2**	**Mesa 3**	**Mesa 1**	**Mesa 2**	**Mesa 3**
1	3500	5400	4500	120	150	200	10	12	12
2	3100	5000	4200	125	150	210	9	11	12
3	3000	5100	4100	120	145	205	10	12	11
4	3400	5500	4600	125	148	205	10	11	11

Solución. Usando los datos anteriores se puede formular el problema de planeación de la producción como sigue:

Minimizar

$$600W_1 + 620W_2 + 620W_3 + 610W_4 + 420H_1 + 410H_2 + 420H_3 + 405H_4 + 800L_1 + 790L_2 + 790L_3 + 800L_4 + 120P_{11} + 150P_{21} + 200P_{31} + 125P_{12} + 150P_{22} + 210P_{32} + 120P_{13} + 145P_{23} + 205P_{33} + 125P_{14} + 148P_{24} + 205P_{34} + 10I_{11} + 12I_{21} + 12I_{31} + 9I_{12} + 11I_{22} + 12I_{32} + 10I_{13} + 12I_{23} + 11I_{33} + 10I_{14} + 11I_{24} + 11I_{34}$$

sujeta a

$$P_{11}/200 + P_{21}/300 + P_{31}/260 \leq W_1$$
$$P_{12}/220 + P_{22}/310 + P_{32}/255 \leq W_2$$
$$P_{13}/210 + P_{23}/300 + P_{33}/250 \leq W_3$$
$$P_{14}/200 + P_{24}/290 + P_{34}/265 \leq W_4$$

$$W_1 = 50 + H_1 - L_1$$
$$W_2 = W_1 + H_2 - L_2$$
$$W_3 = W_2 + H_3 - L_3$$
$$W_4 = W_3 + H_4 - L_4$$

$$I_{11} = 100 + P_{11} - 3500$$
$$I_{21} = 120 + P_{21} - 5400$$
$$I_{31} = 80 + P_{31} - 4500$$
$$I_{12} = I_{11} + P_{12} - 3100$$
$$I_{22} = I_{21} + P_{22} - 5000$$
$$I_{32} = I_{31} + P_{32} - 4200$$
$$I_{13} = I_{12} + P_{13} - 3000$$
$$I_{23} = I_{22} + P_{23} - 5100$$
$$I_{33} = I_{32} + P_{33} - 4100$$
$$I_{14} = I_{13} + P_{14} - 3400$$
$$I_{24} = I_{23} + P_{24} - 5500$$
$$I_{34} = I_{33} + P_{34} - 4600$$

$$P_{it}, I_{it}, W_t, H_t, L_t \geq 0 \qquad t = 1, \ldots, 4; \qquad i = 1, \ldots, 3$$

Usando un paquete estándar de programación lineal, la solución óptima del problema es

	Demanda			Inventario		
Trimestre	Mesa 1	Mesa 2	Mesa 3	Mesa 1	Mesa 2	Mesa 3
1	3400	5280	4420	0	0	0
2	3100	5000	4200	0	0	0
3	3000	5100	4100	0	0	0
4	3400	5500	4600	0	0	0

Trimestre	Trabajadores	Contratados	Despedidos
1	51.60	1.60	0.00
2	47.69	0.00	3.91
3	47.69	0.00	0.00
4	53.32	5.64	0.00

Valor de la función objetivo = $8 354 166

Las variables de fuerza de trabajo no son enteras, de manera que debe aplicarse un procedimiento de redondeo. Contratar dos trabajadores en el primer trimestre, despedir cuatro en el segundo, contratar seis en el cuarto y ajustar el costo total debe ser una solución aceptable. Al igual que con otros modelos de programación lineal persentados, el análisis de sensibilidad proporciona un buen conocimiento de otras soluciones posibles.

Ahora considere varios productos, cada uno de los cuales puede fabricarse de diferentes maneras, que pueden representar distintos procesos con tiempos de preparación de cero o tal vez plantas diferentes. Suponga que hay m_i maneras, o procesos, para fabricar el producto í. Más aún, suponga que se dispone de K recursos diferentes, y que hacer una unidad del producto i en el proceso j requiere a_{ijk} unidades del recurso k. En el periodo t, hay A_{kl} unidades del ¡recurso k disponibles. Los recursos pueden representar horas-trabajador u horas-máquina en U4 departamento específico. Nebol (1987) proporciona un modelo detallado para planear la producción de telas. Este modelo considera 300 productos de tela que se fabrican en 18 plantas.! Sea

T = longitud del horizonte, en periodos
N = número de productos
K = número de tipos de recursos
t = índice de periodos, $t = l,2,\ldots,T$
i = índice de productos, $i = 1,2,\ldots, N$
k = índice de tipos de recursos, $k = 1,2,\ldots, K$
D_{it} - número pronosticado de unidades demandadas del producto i en el periodo t
m_i = número de procesos diferentes disponibles para hacer el producto i
A_{kt} = cantidad disponible del recurso k en el periodo t
a_{iJk} = cantidad requerida del recurso k por una unidad de producto i si se fabrica en el proceso j
Cy_t = costo de producir una unidad del producto i usando el proceso j en el periodo t
C'_{it} = costo de mantener una unidad del producto i en inventario durante el periodo t

Las variables de decisión son

P_{ijt} = número de unidades del producto i fabricadas por el proceso j en el periodo t I_{it} = número de unidades del producto i en inventario al final del periodo t

La formulación de programación lineal es

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{m_i} (C_{ijt}^{P} P_{ijt} + C_{it}^{I} I_{it})$$

$$\text{sujeta a} \quad \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{m_i} a_{ijk} P_{ijt} \le A_{kt} \qquad t = 1, 2, \ldots, T; \quad k = 1, 2, \ldots, K$$

$$I_{it} = I_{it-1} + \sum_{j=1}^{m_i} P_{ijt} - D_{it} \qquad t = 1, 2, \ldots, T; \quad i = 1, 2, \ldots, N$$

$$P_{ijt}, \ I_{it} \ge 0 \qquad t = 1, 2, \ldots, T; \quad i = 1, 2, \ldots, N; \quad j = 1, 2, \ldots, m_i$$

Ejemplo 5-3. Plan de procesado para Cactus Cycle. Cactus Cycle produce dos tipos de bicicletas, de pista y de campo. Debe planearse la producción para los próximos tres meses. La demanda estimada por mes de las bicicletas de pista es 1000,1050 y 1100 unidades y para la de campo es 500, 600 y 550. El inventario actual es 100 unidades para las bicicletas de pista y 50 para las de campo. Se usan dos recursos diferentes, horas-trabajador y horas-máquina, y dos procesos distintos para fabricar ambas bicicletas. La información adicional sobre capacidad disponible de recursos por unidad, costo de almacenaje por unidad, costo unitario y requerimientos de recursos por unidad son:

			Costo					
	Capacidad (horas)		Almacenaje		Proceso 1		Proceso 2	
Mes	**Máq.**	**Trab.**	**Pista**	**Campo**	**Pista**	**Campo**	**Pista**	**Campo**
1	8 600	17 000 8	5 6	6	72	85	80	90
2 3	500	16 600 8	5	7	74	88	78	95
	800	17 200		7	75	84 5	78	92 4
	Horas-máq. requeridas				8 10	12	6 8	9
	Horas-trab. requeridas							

Solución. Usando los datos anteriores, la formulación de programación lineal está dada por

$$\begin{aligned} \text{Minimizar} \quad & 5I_{11} + 6I_{12} + 5I_{13} + 6I_{21} + 7I_{22} + 7I_{23} + 72P_{111} + 80P_{121} \\ & + 85P_{211} + 90P_{221} + 74P_{112} + 78P_{122} + 88P_{212} + 95P_{222} \\ & + 75P_{113} + 78P_{123} + 4P_{213} + 92P_{223} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{sujeta a} \quad & 5P_{111} + 4P_{121} + 8P_{211} + 6P_{221} \le 8\,600 \\ & 10P_{111} + 8P_{121} + 12P_{211} + 9P_{221} \le 17\,000 \\ & 5P_{112} + 4P_{122} + 8P_{212} + 6P_{222} \le 8\,500 \\ & 10P_{112} + 8P_{122} + 12P_{212} + 9P_{222} \le 16\,600 \end{aligned}$$

$$5P_{113} + 4P_{123} + 8P_{213} + 6P_{223} \leq 8\,800$$
$$10P_{113} + 8P_{123} + 12P_{213} + 9P_{223} \leq 17\,200$$

$$I_{11} = 100 + P_{111} + P_{121} - 1000$$
$$I_{12} = I_{11} + P_{112} + P_{122} - 1050$$
$$I_{13} = I_{12} + P_{113} + P_{123} - 1100$$
$$I_{21} = 50 + P_{211} + P_{221} - 500$$
$$I_{22} = I_{21} + P_{212} + P_{222} - 600$$
$$I_{23} = I_{22} + P_{213} + P_{223} - 550$$

$$P_{ijt},\ I_{it} \geq 0 \qquad t = 1, 2, 3; \qquad i = 1, 2; \qquad j = 1, 2$$

La solución para este problema es

	Bicicleta de pista			Bicicleta de campo		
	Proceso			Proceso		
Mes	1	2	Inventario	1	2	Inventario
1	900	0	0	118.75	525	193.75
2	1050	0	0	406.25	0	0.00
3	0	1100	0	550.00	0	0.00

Valor de la función objetivos = $8 354 166.

Se supone que los recursos son fijos para el periodo; sería sencillo manejar las restricciones de contratación y despido igual que en el modelo anterior. Lo mismo es cierto paria las horas extra y la subcontratación. El redondeo de la producción e inventario de la biciclјeta B no debe ser problema. El análisis de sensibilidad puede proporcionar un buen panorama (je las soluciones de programación lineal.

SECCIÓN 9 EJERCICIOS

5.27. Desarrolle y resuelva un modelo para ProtoPlastic que considere en forma explícita ambos pro ductos. Compárelo con el plan agregado del ejercicio 5.11 y el plan desagregado del ejercicio 5.25.

5.28. Desarrolle y resuelva un modelo para Goode Foods (ejercicio 5.19) que considere las tres familias de productos. Compárelo con el plan agregado.

5.29. Hardbody fabrica dos máquinas de ejercicio, la Flex (F) y la Crunch (C). La demandaj estimada para la Flex es 1500,1200 y 1600 unidades y para la Crunch es 1000,1200 y 900 unidades para los siguientes tres meses. El inventario actual es 550 unidades de Flex y 250 unidades de Cjrunch. En la fabricación de ambas máquinas se usan dos recursos, horas-trabajador y horas-máquina. La in formación adicional disponible sobre recursos por unidad, costo de almacenamiento p0r unidad, costo unitario y requerimientos de recursos por unidad son los siguientes:

	Capacidad (horas)		Costo ($)			
			Almacenaje		Proceso	
Mes	**Máq.**	Trab.	**F**	**C**	**F**	**C**
1	740	12 000	22	31	650	930
2	850	15 000	22	31	670	930
3	800	11400	23	32	680	950
	Horas-máq.	requeridas			0.45	0.75
	Horas-trab.	requeridas			6	12

Desarrolle un modelo y resuélvalo para la producción de los siguientes tres meses en Hardbody.

5.30. Suponga que Hardbody puede usar hasta 20% de la capacidad en horas extra en cualquier mes a un costo 60% más alto. Dé el modelo modificado y la solución.

5.31. Newman Foundry hace rotores de precisión troquelados de acero con base de níquel (Ni) y con base de titanio (Ti) para la industria aérea. El proceso estándar se usa normalmente para hacer am bos. Sin embargo, otro proceso que usa otras materias primas y características operativas en el tro quel cambia las propiedades del rotor, lo que da como resultado otros requerimientos de maquinaria después del troquel. Los datos son los siguientes:

	Capacidad (horas)		Costo ($1000)			
			Proceso estándar		**Otro proceso**	
Mes	**Forja**	**Torno**	**Ni**	**Ti**	**Ni**	**Ti**
1	400	590	1.20	7.85	1.60	9.20
2	420	610	1.25	8.50	1.70	9.90
Horas requeridas		Forja	5 5	12 5	3 9	8
		Torno				12

Se han firmado contratos por 50 rotores con base de níquel y 18 con base de titanio para el próximo mes, y se esperan 55 y 20 para el siguiente. Cuesta $ 1000 mantener un rotor con base de níquel en inventario durante un mes. El costo de almacenaje para el rotor de titanio es $4000 por rotor por mes. Desarrolle y resuelva un modelo para ayudar a Newnan en su planeación de la producción.

10 PLANEACIÓN AGREGADA EN LA PRÁCTICA

La planeación agregada genera un plan de producción en unidades agregadas, a partir de los pronósticos (capítulo 4), y el plan agregado se desagrega en un plan para artículos individuales. Este plan se convierte en el plan maestro de producción (capítulo 7). El cuadro 5-1 da un panorama de la planeación agregada en la Olean Tile Company. Ellos generan planes agregados con un modelo de transporte similar al estudiado en la sección 5.7. Este modelo tiene alrededor de 1660 variables y 570 restricciones.

Conforme mejoran la capacidad de las computadoras y los algoritmos de optimización, la necesidad de la planeación agregada disminuye. La planeación se puede hacer a un nivel más detallado, similar al de los modelos de la sección 5.9. DeMatta y Miller (1993) analizan la evo-

lución del modelo de Olean Tile. El nuevo modelo considera el inventario a nivel de prpducto, y algunos modelos tienen 30 000 variables y 13 000 restricciones.

Alien y Schuster (1994) estudian planes desagregados en Welch's Foods. Las expectativas crecientes de los clientes para este tipo de manufactura para almacenaje requieren que s¿ ponga más atención a la seguridad, la demanda dinámica, el error de pronóstico, el tiempo de entrega de la manufactura, la calidad del producto, el tiempo de caducidad y la clasificación ABC (capítulo 6). La mejor utilización de la capacidad implica que el sistema de planeación Necesita mantener la producción planeada dentro de los límites de capacidad, balancear los costos de preparación y de inventario y producir una gran variedad de productos. Los resultados que reportan se refieren a una línea de manufactura con 14 productos terminados agrupados en cuatro familias.

CUADRO 5-1

PLANEACIÓN AGREGADA EN OLEAN TILE

La planeación de la producción se puede ver como una jerarquía de las actividades de tomajde decisiones administrativas. La jerarquía va de planeación estratégica a planeación táctica pftra el control de las operaciones.

Este sistema de planeación de la producción j erárquica se desarrolló en la American 0 lean Tile Company (AO) debido al interés de la administración por usar ayudas para la toma de < lécisiones basadas en computadora, para integrar

1. El desarrollo del plan de producción anual y la fuente de abastecimiento
2. Las actividades de programación de la producción a corto plazo en cada planta y
3. Los procedimientos de control de inventarios en los puntos de distribución (PD).

MARCO DE REFERENCIA DE LA PLANEACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

El diseño de cualquier esquema para agregar productos depende de la estructura del produ ;to; y la consistencia y la factibilidad constituyen los objetivos y restricciones primordiales (Gt lders y Van Wassenhove, 1982). La línea de productos de azulejo de cantera se agregó en 10 familias, cada una con varios cientos de artículos o unidades para almacenar. Debido a que el número de familias de productos es pequeño, se incorporó la estacionalidad de la demanda a nivel familia en el sistema. El enfoque de Hax-Meal [1975] agrupa familias en tipos que tienen] >atrones de estacionalidad similares. El nivel agregado que se empleó en AO es adecuado tan ol por la naturaleza de los azulejos como por el proceso de manufactura.

En términos más generales, el azulejo se puede clasificar en dos tipos de productos: ¡ izulejo liso y azulejo de borde. El azulejo liso forma cerca del 90% del total de las ventas de car téra y se produce en alrededor de 10 formas básicas (por ejemplo, 4" x 8" o 6" x6"). Los azule o|s de borde son piezas de azulejo especialmente diseñadas para formar el terminado entre la si: perficie cubierta y alguna otra superficie (por ejemplo, el borde en donde se intersectan el suelo y una pared).

El proceso de producción de azulejos lisos en sí mismo provocó que fuera lógico ce ndensar aún más las unidades de almacenamiento en familias de productos. Además de formi i y color básicos, el azulejo liso se hace con diferentes tipos de superficie (por ejemplo, noimal y

CUADRO 5-1 (Continuación)

abrasiva), y con variaciones en el color básico (por ejemplo, gris y gris brillante). Sin embargo, todos los azulejos hechos a partir de una forma plana básica en un color requieren materias primas muy similares y tienen costos de manufactura y restricciones prácticamente idénticos. Por lo tanto, varias unidades de almacenamietno de azulejo liso se pueden agregar en una familia de productos con un impacto mínimo en la exactitud de los resultados del modelo. El proceso para agregar dio la formulación de 10 familias importantes que constituyen el 98% de las ventas totales de cantera.

IMPLANTACIÓN

El proceso de implantación de la revisión de planta, familias y asignación de patrones a puntos de venta sugeridos por el modelado ha requerido al menos tanto esfuerzo como el proceso mis-' mo de desarrollo del modelo.

Lo primero y más importante es hacer hincapié en los ahorros potenciales que resultan al implantar el modelo. El interés de la administración creció debido a que los beneficios serían ' constantes. Segundo, el uso de un proceso por etapas para la implantación permitió que se hi-; cieran cambios a una velocidad aceptable. Las reasignaciones masivas no se requirieron al principio ni tampoco hubieran sido aprobadas por la alta administración. Por ejemplo, el mode-'•■ lo sugería muchos cambios en la fuente de abastecimiento para los puntos de venta. No obstante, sólo hubo que alterar unas cuantas asignaciones en cada etapa. Esto facilitó una transición suave y evitó la confusión y la resistencia que de otra manera hubieran surgido.

COSTOS Y BENEFICIOS

Los costos de desarrollo caen dentro de dos categorías básicas: 1) meses-hombre comprometi-' dos con el desarrollo y recolección de datos y 2) gastos en software.

El desarrollo requiere aproximadamente cinco meses-hombre del tiempo de un analista distribuidos a lo largo de nueve meses. El modelo de computadora se desarrolló y colocó en un sistema comercial de tiempo compartido a un costo menor a $10 000.

Un sistema jerárquico integrado para la planeación y programación de la producción ofrece muchos beneficios tanto a nivel de componentes individuales como de todo el sistema de una organización. Estos beneficios van de una mejor coordinación y comunicación entre los departamentos a una reducción sustancial en los costos de producción y distribución. Como un todo, el sistema resalta en forma significativa la habilidad de American Olean para ser más competitiva en el mercado. AO usa el modelo de asignación anual para desarrollar el plan de producción y distribución de la división de cantera. Este plan ahorra entre $400 000 y $750 000 ' anuales. El plan sugerido no altera sustancialmente las cargas de capacidad en las plantas, pero í sí sugiere cambios significativos en las mezclas de las familias. Así, el modelo descubrió venta-; jas comparativas en los costos en términos de costos de entrega (costos variables de producción y fletes) desde cada planta.

Como beneficio indirecto, el proceso de desarrollar el modelo simuló una coordinación más estrecha entre los departamentos de mercadotecnia y manufactura para cumplir con las ne-

CUADRO 5-1
(continuación)

cesidades de los territorios de venta. AO también obtuvo otros beneficios indirectos que es difícil cuantifícar. En particular, esta metodología produce un patrón general de costos menores en los puntos de distribución de AO. Esto ofrece a la alta administración la opción mercadológica de bajar el precio del producto (o al menos minimizar cualquier incremento en los precios), manteniendo al mismo tiempo los márgenes de utilidad requeridos por AO con base en cada articulo.

El modelo de planeación anual puede ayudar a la administración de AO a medir el impacto financiero de ajustar algunas estrategias a mediano plazo de manufactura y distribución. Por ejemplo, una planta puede haber dejado de hacer un producto específico porque el costo de la materia prima básica subió. El modelo puede determinar, a nivel del sistema, los cambios en los costos anuales de manufactura y distribución, si se puede encontrar una alternativa menos costosa. Otros ejemplos incluyen determinar los ahorros que se obtendrían de decisiones de inversión de capital, como aumentar la capacidad de producción en una planta, y cuál seria el costo ñnanciero que acompañaría la tasa de uso de materiales escasos en una planta.

El modelo de asignación anual también ayuda a reducir los costos de redistribución no planeada que ocurren cada año. Estos costos "ocultos" surgen cuando un punto de distribución transborda un producto a un segundo punto que se quedó sin inventario. Estos costos se reducen dado que las asignaciones ahora están ligadas muy de cerca al patrón de demanda en el área de mercado de cada punto de distribución.

Fuente: Liberatore y Miller (1985), The Instituto of Management Sciences and the Operations Research Society of America (Actualmente INFORMS). Reimpreso con permiso.

11 EVOLUCIÓN

Los orígenes de la planeación agregada formal se pueden encontrar al principio de la década de 1950. Al contrario de muchas otras técnicas para planear y controlar la producción, la planeación agregada es relativamente nueva; la razón para su llegada tardía es que su alcance es más amplio que el de las otras técnicas. La planeación agregada considera al mismo tiempo varios aspectos: planeación, costos, inventarios, fuerza de trabajo, etcétera. Así, se trata de un predecesor del enfoque de sistemas para la planeación y control de la producción. Se identifican cuatro aspectos en la evolución de la planeación agregada:

- Introducción inicial del concepto y su manejo matemático
- Enfoques de programación lineal
  Métodos tabulares y gráficos
  Métodos basados en el conocimiento

Es probable que la planeación agregada haya sido introducida por Holt, Modigliani, Muth y Simón a mediados de los 50. Su motivación era planear la producción para un fabricante local de pinturas; el producto agregado era galones de pintura. Se desarrolló un modelo matemático para el problema. Un elemento interesante de su modelo es que usaron costos cuadráticos en lugar de lineales. Para resolver el modelo, se tomó la derivada de la función objetivo y se igualó a cero. La solución es un conjunto de ecuaciones lineales; por esto, la técnica recibió el nombre de regla de decisión lineal. Se puede encontrar más información en Holt, Modigliani, Muth y Simón (1953).

Después del trabajo realizado por Holt, Modigliani, Muth y Simón, Browman (1963) propuso un enfoque distinto. Las decisiones del periodo actual se basan en las "buenas" decisiones que se tomaron en el pasado. La idea es similar a la regresión y se puede ver como un enfoque de "comportamiento matemático". Algo muy interesante es que Bowman incluye todos los elementos familiares de la planeación agregada, excepto los costos.

Algún tiempo después del trabajo de Holt, Modigliani, Muth y Simón, se propusieron los modelos de programación lineal para la planeación agregada; Hassmann y Hess (1960) fueron de los primeros en hacerlo. Los modelos presentados en este capítulo son una continuación de este enfoque. En la actualidad, se hacen intentos para desarrollar modelos que eviten el plan agregado y planeen directamente los productos. Los modelos avanzados presentados en este capítulo y las referencias sobre la desagregación son algunos ejemplos de tales intentos.

Los métodos tabulares y gráficos, precursores del enfoque de la hoja de cálculo, aparecen en la literatura alrededor de 1960. Estos métodos se han usado en la industria durante muchos años; las computadoras personales y las hojas de cálculo han aumentado su popularidad. Su sencillez es tanto una fortaleza como una debilidad; no garantizan una solución óptima, pero su implantación es sencilla. Por lo general, se encuentran buenos planes con un poco de prueba y error.

La inteligencia artificial y los sistemas expertos se han aplicado a la planeación agregada (Duchessi y O'Keefe, 1990). Estos enfoques incorporan las reglas tradicionales de planeación de una manera heurística. El modelo es menos abstracto que los modelos matemáticos, pero a costa de la optimalidad. La planeación agregada obtenida de estos modelos indica que es un enfoque con credibilidad para el problema de planeación agregada.

Los métodos más ampliamente usados de planeación agregada son los tabulares. Sin embargo, no debe subestimarse la importancia de otros modelos. Las soluciones de los modelos, a la par con el análisis de sensibilidad, proporcionan un panorama del ambiente en el que se sumerge el problema de planeación agregada. Si se construyen bien, estos modelos requieren que la administración tome en cuenta un alcance mayor al planear la producción.

12 RESUMEN

La planeación agregada se concentra en los problemas de planeación de la producción a mediano plazo. En este nivel, se considera una unidad agregada y no un producto individual. La unidad agregada se define por medio de alguna medida común a todos los productos, como horas de producción o dólares. Los factores de la planeación agregada incluyen capacidad, costos de producción, costos de cambio en la capacidad y costos de inventario.

Se usan dos enfoques primordiales para generar un plan de producción agregado: la hoja de cálculo y los métodos cuantitativos.

Los métodos de hoja de cálculo son enfoques de prueba y error. Las estrategias comunes son inventario cero, nivel de producción (fuerza de trabajo constante) y estrategias mixtas. El resultado es un plan agregado factible que generalmente proyecta un costo realista.

Los métodos cuantitativos que se usan en planeación agregada son variaciones de programación lineal. Bajo las suposiciones dadas, estos métodos llevan a un plan agregado óptimo. Los modelos de programación lineal se pueden extender a situaciones de planeación más generales, incluyendo productos y procesos múltiples.

MINICASO: BF SWINGS II

Recuerde el problema de los columpios BF en el capítulo 4. Ahora Ben está preocupa^ sobre su producción para los siguientes meses, y le asigna el trabajo de obtener un plan de producción de cuatro semanas. Parte de su motivación es que piensa que hay mucho inventario. Sjamir, el capataz, alega que no puede ser cierto porque el área de almacenaje está limitada y qué en ningún momento puede haber más de 500 artículos completos en inventario. Otra motivación es que Lupe, el contador, dice que los costos del tiempo extra forman una gran parte de sus costos totales de operación. Chan, del departamento de personal, piensa que deben contratar más trabajadores para disminuir el tiempo extra. Cuando se le preguntó, Chan admitió que la capacitación costaría $1000 por trabajador, y sus salarios son de $400 semanales. Bobbie Ruth señala que, por ley, cualquier trabajador despedido debe recibir la paga de tres semanas, y que el tiempo extra cuesta 50% más. Lupe indica que si se aumentan las prestaciones adicionales y la depreciación del equipo, el costo del tiempo extra será aproximadamente el doble del tiempo normal en cada departamento, y que las horas extra no pueden ser más de tres al día a menos que los empleados trabajen los sábados. Samir sostiene que el aumento de empleados puede no incrementar la capacidad ya que tal vez se necesite también más equipo. Ben está de acuerdo en esto, excepto en el caso de lijado, ensamble y acabado que casi no requieren equipo.

Gracias a las precauciones de Bobbie Ruth se dispone de algunos datos. La siguiente tabla da el costo por hora, incluyendo mano de obra, del trabajo en cada departamento. Los costos de inventario semanales son $0.30, $0.80 y $0.90 por unidad. Se tienen 70 bancos, 255 cunas y 110 columpios en inventario. El resto de la información se puede encontrar en el minicaso del capítulo 4.

Departamento	**Costo en $/hora**	**Departamento**	**Costo en $/hora**
Perforadora	**$12**	Ruteadora/formado	**$15**
Torno	**$15**	Nivelado	**$15**
Sierra caladora	**$12**	Lijado	**$10**
Sierra de corte	**$12**	Ensamble	**$10**
Ranurado	**$20**	Terminado	**$10**
Cepillado	**$20**		

La demanda pronosticada de los productos para las siguientes cuatro sem;

Semana	**Bancos**	**Cunas**	**Columpios**
117	100	**344**	**24**
118	109	352	146
119	**90**	368	279
120	106	361	**64**

Desarrolle un plan de producción para cuatro semanas para BFS. ¿Qué decisiones importantes deben tomarse? ¿Qué nivel de detalle se necesita? Si se trata de un plan agregapo, ¿deben agregarse los productos o los procesos o ambos? ¿Qué método de solución parece ser el mejor?

13 REFERENCIAS

Alien, S. J. y Schuster, E. W., "Practical Production Scheduling with Capacity Constraints and Dynamic Demand: Family Planning and Disaggregation", *Production & Inventory Management Journal,* 35, 4,15-21 (1994).

Bowman, E. H., "Consistency and Optimality in Managerial Decisión Making", *Management Science,* 9, 310-321,1963.

Bowman, E. H., "Production Scheduling by the Transportation Method of Linear Programming", *Operations Research,* 4,100-103,1956.

Duchessi, P. y O'Keefe, R. M., "A Knowledge Based Approach to Production Planning", *Journal ofthe Operational Research Society,* 41,377-390,1990.

De Metta, R. y Miller, T. "A Note on the Growth of a Production Planning Sysstem: A Case Study en Evolution", *Interfaces,* 23,4, 116-122, 1993.

Hanssmann, F. y Hess, S. W., "A Linear Programming Approach to Production and Employment Scheduling", *Management Technology,* 1, 46-51, 1960.

Hax, A. C. y Meal, H. C, "Hierarchical Integration of Production Planning and Scheduling", en *Studies in Management Sciences, Volume 1, Logistics,* Geisler, M. A., ed., North Holland-American Elsevier, Nueva York, 1975.

Holt, C. C, Modigliani, J. F., Muth, J. F., y Simón H., "A Linear Decisión Rule for Production and Employment Scheduling", *Management Science,* 1,1-30,1953.

Johnson, L.A. y Montgomery, D. C, *Operations Research in Production Planning, Scheduling and Inventory Control,* John Wiley & Sons, Nueva York, 1974.

Lawrence, K. D. y Zanakis, S. H., *Production Planning and Scheduling: Mathematical Programming Applications,* Industrial Engineering and Management Press, Norcross, GA, 1984.

Liberatore, M. J. y Miller. T., "A Hierarchical Production Planning System," *Interfaces,* 15,4,1-11,1985.

Masud, A. S. M. y Hwang, C. L., "An Aggregate Production Planning Model and Application of Múltiple Objective Decisión *M^ihcÁs", International Journal of Production Research,* 118,115-127,1980.

Nebol, E., "Macro Production Planning: An Applied Research Project", *Interfaces,* 17, 71-77,1987.

Stadtler, H., "Tuning Aggregate Planning With Sequencing and Scheduling", en *Multi-Stage Production Planning and Inventory Control,* Axsater, S., Schneeweis, C. y Silver, E., eds., Springer-Verlag, Berlín, 1986.

Zoller, K., "Optimal Disaggregation of Aggregate Production Plan", *Management Science,* 17, B553-B549,1971.

CAPÍTULO

6

Inventarios: sistemas de demanda independiente

El inventario se usa en la mayor parte de las actividades de manufactura, servicio, distribución y venta, y debido a que puede resaltar la rentabilidad y la competitividad, se estudia ampliamente en el sector de manufactura. ¿Qué es inventario? ¿Qué aspectos, problemas y complejidades están asociados con él? Para entender estas preguntas se analiza un sistema sencillo de manufactura-distribución, una tienda de donas. La mayoría de las personas están familiarizadas con este tipo de operación.

Al entrar a la tienda, se observan charolas con toda clase de donas, que es el inventario de **productos terminados** de la tienda. Las donas se hornean y se ponen en charolas para que cuando entra un cliente a la tienda se le pueda servir de inmediato. Este inventario ejciste debido a un receso temporal entre dos actividades —en este caso abastecimiento (el proceso de horneado) y demanda (el cliente)—. Otro tipo de inventario en este sistema es la **materia prima:** harina e ingredientes necesarios para preparar las donas. Éste también representa ima pausa entre el abastecimiento (obtención de materia prima) y la demanda (proceso de cocinar las donas).

Se observarán las decisiones que tiene que tomar el dueño respecto al inventario. La primera decisión es la cantidad, cuántas donas de cada tipo preparar o cuánta harina e ingredientes ordenar. La segunda decisión concierne al tiempo, esto es, cuándo hacer un pedido p(j>r la cantidad dada. ¿Deben hacerse las donas cuando la charola está vacía o cuando quedan 10 donas? ¿Debe ordenarse harina una vez a la semana o cuando baja a cierta cantidad mínima?

Estas dos decisiones están afectadas por la demanda del producto terminado —cuántas donas se venderán en las siguientes horas o días—. Esta demanda es incierta. No se sabe de antemano cuándo o cuántos clientes vendrán a la tienda ni cuántas donas de cada tipo comprarán. Lo más que se puede hacer es pronosticar esta demanda.

Para tomar en cuenta la incertidumbre, el dueño puede tener una cantidad grande de donas disponibles, pues requiere estar listo para responder a cualquier demanda futura. Lia sanción por hacer esto puede ser quedarse con muchas donas sin vender que se desperdician Cuando se "enfrían". Por otro lado, si los clientes quieren cierta dona que no hay, se incurrirá eiji una sanción diferente, al menos la pérdida del ingreso por el faltante.

Lo que gradualmente se revela es que incluso para este ejemplo sencillo el tema de inventarios no es obvio. Es un elemento clave en la rentabilidad de la tienda de donas. En las organizaciones de manufactura con cientos de productos, el problema del inventario es aún jnás complejo y difícil de resolver.

1 CONCEPTOS DE INVENTARIOS

El ejemplo de las donas muestra que el inventario es un sistema importante y complejo y que se debe comprender su naturaleza antes de analizarlo. Esta sección se usará para hacer justo eso. Primero, se amplía el estudio del papel que juega el inventario. Los sistemas de inventarios tienen terminología específica, que se presenta a continuación. Después se identifican los costos de inventario y se presentan algunas medidas de efectividad para estos sistemas. Se concluye con el análisis de las políticas comunes y la relevancia de los modelos de inventarios.

1.1 El papel que juega el inventario

Hasta ahora, sólo se ha descrito el inventario, pero no se ha definido. Entre las muchas definiciones disponibles, se ha seleccionado la siguiente:

> Una cantidad de bienes bajo el control de una empresa, guardados durante algún tiempo para satisfacer una demanda futura.

Para el sector de manufactura, tales bienes son principalmente materiales: materia prima, unidades compradas, productos semiterminados y terminados, refacciones y materiales de consumo.

Esta definición reitera lo que se observó en el ejemplo de las donas. El inventario es un "amortiguador" entre dos procesos: el abastecimiento y la demanda. El proceso de abastecimiento contribuye con bienes al inventario, mientras que la demanda consume el mismo inventario. El inventario es necesario debido a las diferencias en las tasas y los tiempos entre el abastecimiento y la demanda, y esta diferencia se puede atribuir tanto a factores internos como externos. Los factores endógenos son cuestiones de política, pero los exógenos son incontrolables. Entre los factores internos están las economías de escala, el suavizamiento de la operación y el servicio al cliente. El factor exógeno más importante es la incertidumbre.

Las **economías de escala** pueden hacer que un inventario sea deseable aun cuando sea posible balancear el suministro y la demanda. Existen ciertos costos fijos asociados con la producción y la compra; éstos son los costos de preparación y los costos de ordenar, respectivamente. Para recuperar este costo fijo y reducir el costo unitario promedio se pueden comprar o producir muchas unidades. Estos tamaños de lote grandes se ordenan con poca frecuencia y se colocan en inventario para satisfacer la demanda futura.

El **suavizamiento de la operación** se usa cuando la demanda varía con el tiempo. Anticongelante o acuamotos serían algunos ejemplos. El inventario acumulado en periodos de demanda baja se usa para satisfacer la demanda alta de otros periodos; ello permite que las instalaciones de producción operen a una tasa relativamente constante de producción, característica deseable en la manufactura.

El **servicio a clientes** es otra razón para mantener un inventario. El inventario se forma para poder cumplir de inmediato con la demanda, lo que lleva a la satisfacción del cliente.

La **incertidumbre** se presentó en el ejemplo de las donas. Una manera de evadir la incertidumbre es mantener en inventario más unidades de las pronosticadas como demanda; esto evita la posibilidad de quedarse sin unidades si la demanda real excede al pronóstico. Este inventario adicional se llama inventario de seguridad. El proceso de reabastecimiento es otra fuente de incertidumbre que puede justificar mantener un inventario de seguridad. El tiempo de entre-

ga es el tiempo que transcurre entre emitir una orden y recibirla. Cuando el tiempo dje entrega es incierto, puede ser que no se reciba la orden en la fecha planeada. El inventario de sjeguridad ofrece cierta protección contra un paro en la producción por la incertidumbre en el tiempo de entrega.

El papel del inventario descrito hasta el momento es opcional. Existe una razón distinta por completo para mantener un inventario, la explotación del mercado. Con frecuencjia las peculiaridades del mercado son la causa de que un inventario llegue a ser una ventaja económica. La fluctuación en los precios del mercado puede justificar la adquisición de más materia prima que la requerida para la demanda estimada. Se resalta el hecho de que esto es altamentje especulativo y debe dejarse a la función de finanzas en la organización y no a los administradores de operaciones. De acuerdo con lo anterior, no se analizará más el papel del inventario

1.2 Terminología de inventario

En el ejemplo de la tienda de donas, se identificó la demanda como incierta y se mencionaron dos tipos de inventario, materia prima y producto terminado. Se definirán formalmeijite distintos tipos de ambientes de demanda y varias clases de inventarios.

El **ambiente de demanda** se puede clasificar en dos grandes categorías: determinístico o estocástico e independiente o dependiente.

Deíerminísdco o estocástico. Determinístico significa que se conoce con certidumbre la demanda futura de un artículo en inventario; esta demanda aleatoria se llama estocástica. Cada caso requiere un análisis diferente. El caso estocástico es más realista, pero su manejo es más complicado.

Demanda independiente o dependiente. La demanda de un artículo no relacionada con otro artículo y afectada principalmente por las condiciones del mercado se llama demanda independiente. Los ejemplos incluyen ventas al menudeo o producto terminado en la manufactura. La demanda dependiente es muy común en la manufactura (la demanda de una unidad s0 deriva de la demanda de otra). Un ejemplo sería un automóvil, llantas y tuercas. Cada vehículo requiere cuatro llantas y cada llanta requiere tuercas. La demanda de automóviles es independiente; las llantas y las tuercas tienen una demanda dependiente. Aquí se tiene una jerarquía de tres niveles, llamada estructura del producto. Así, un vehículo genera la demanda de cuatro llantas (sin contar la de refacción) y 16 tuercas. En el ejemplo de las donas, la demanda de donas es independiente, y la demanda de harina es dependiente. Este capítulo estudia sistemas *d$* demanda independiente; el capítulo 7 examina los sistemas de demanda dependiente. Se hace notar que una parte de los análisis es común a los dos sistemas.

Los **tipos de inventario** en los sistemas de producción se clasifican según el valbr agregado durante el proceso de manufactura. Las clasificaciones son materia prima, producto en proceso (PEP) y productos terminados. A continuación se definirá cada tipo.

La materia prima incluye todos los materiales requeridos para los procesos de manufactura y ensamble. Normalmente son los siguientes:

- Material que necesita más procesamiento (harina, madera, barras de acero)
- Componentes que forman parte de un producto tal como están (chips de computjadora, tor nillos)
- Artículos de consumo (soldadura, electrodos, pegamento, tornillos)

El producto en proceso (PEP) es inventario en el sistema de producción que espera para ser procesado o ensamblado y puede incluir productos semiterminados (una tuerca roscada pero sin recubrimiento) o subensambles (cinescopios de televisor).

Los **productos terminados** son las salidas de los procesos de producción, en ocasiones llamados artículos finales —cualquier mercancía, un automóvil, una camisa, un refresco—. La demanda de productos terminados por lo general es independiente. Los productos terminados de una organización de manufactura pueden ser materia prima para otra; por ejemplo, las llantas para los automóviles.

1.3 Costos de inventarío

Se define un inventario como una "cantidad de un bien"; como tal, incurre en costos. El costo de compra es obvio. Otros tipos de costos son el costo de ordenar (de preparación), el costo de almacenaje, el costo por faltantes y el costo de operación del sistema. Se explicará cada uno en detalle.

El **costo de compra** es el costo por artículo que se paga a un proveedor (llamado también costo de materiales). Sea c el costo unitario y Q el número de unidades compradas (tamaño del lote). Entonces el costo total de compra es cQ,*una* función lineal de Q. En algunos casos el proveedor tiene una tabla de costos basada en la cantidad comprada. Este costo unitario es una función de Q y el costo de compra es una función más compleja (vea la sección 2.1.3).

Si se fabrica una unidad, c incluye tanto el costo del material como el costo variable para producirla. El costo total de manufactura para un lote de producción es cQ.

Un **costo de ordenar** —el costo de preparar y controlar la orden— es aquel en que se incurre cada vez que se coloca una orden con el proveedor. Es independiente del tamaño del lote que se compra y, por lo tanto, es un costo fijo denotado por A. Sin embargo, el costo anual de ordenar, que se estudiará más adelante, depende del tamaño del lote. Para un lote fabricado, el costo fijo está dominado por el costo de preparación, que incluye el costo de preparar la máquina para la corrida de producción (tiempo ocioso de la máquina y mano de obra) y quizá algunos costos de materiales para el arranque debido a rechazos iniciales. Se usa la misma notación, A, para el costo de preparación.

El costo total de comprar o producir un lote es

$$A + c\,Q$$

Consiste en una componente fija A y una componente variable cQ.

El inventario compromete el capital, usa espacio y requiere mantenimiento, y todo cuesta dinero. Esto se llama **costo de almacenaje** o de mantener el inventario e incluye lo siguiente:

- Costo de oportunidad
  Costos de almacenaje y manejo
  Impuestos y seguros
  Robos, daños, caducidad, obsolescencia, etcétera.

El costo de almacenar comienza con la inversión en el inventario. El dinero comprometido no puede obtener rendimientos en otra parte. Este costo es un costo de oportunidad, que por lo general se expresa como un porcentaje de la inversión. El valor más bajo de este costo de opor-

tunidad es el interés que ganaría el dinero en una cuenta de ahorros. La mayor parte de las empresas tienen mejores oportunidades que las cuentas de ahorros y muchas tienen una tasa mínima de retorno, que usan para evaluar inversiones, normalmente llamada costo de capital. La misma tasa se puede usar como parte del costo de mantener el inventario.

Los costos se calculan como un porcentaje de la inversión en inventario y se suman al costo de oportunidad, esto genera el costo total de mantener el inventario. Entonces, si el c^sto de capital es 25% anual y otros tipos de costo suman un 10% adicional, el costo total de alnjiacenaje será 35%. Es decir, por cada dólar invertido en inventario, durante un año, se pagan 35 centavos. Se define

$$i = \text{costo total de mantener inventario (expresado como porcentaje)}$$

Éste es el costo de mantener $ 1 de inventario durante una unidad de tiempo. Debido a qifie el inventario casi siempre se mide en unidades y no en dólares, y recordando que el costo de una unidad es *c*, se obtiene

$$h = ic$$

donde *h* es el costo de mantener una **unidad** en inventario durante una unidad de tiempo, expresado en dólares. Los valores típicos anuales de *i* van de 25 a 40%, pero *i* puede llegar hasta 60%.

En el ejemplo de la tienda de donas, se introdujo el concepto de **costo por faltante,** Un faltante ocurre cuando existe una demanda de un producto que no se tiene. Un faltante puede surtirse atrasado o perderse; la demanda de bienes durables con frecuencia se satisface con atraso. Así, si la tienda no tiene el televisor que desea, usted puede estar dispuesto a esperar h^sta que lo tengan. Por otro lado, la demanda puede perderse si la tienda de donas no tiene el ^ipo que quiere. Si usted va a otro lado se llama venta perdida.

En ambos casos se paga una sanción. Si la demanda se pierde, la pena más importante es la ganancia perdida y la pérdida de la buena voluntad. Si la demanda se surte atrasada existe un costo adicional al expedirla, costos de registro en libros y la reputación de un mal servicio al cliente. Lo común es que un faltante de material para producción se surta atrasado, por tanto, la sanción es que la producción se detiene, volver a arrancarla y tal vez la entrega tardía del producto final al cliente.

Existen dos tipos de costos por faltantes. Uno es el resultado de que falte una unidad; el otro considera el tiempo que la unidad falta.

Se define:

n = costo de faltante por unidad
n = costo de faltante por unidad que falta por unidad de tiempo

Casi siempre se usa TI para las ventas perdidas; los faltantes usan ambas. Observe queñ es para los faltantes lo que *h* es para el inventario. Es difícil estimar el costo por faltantes y puede ser una estimación subjetiva.

Por último, existen costos relacionados con la operación y el control de los sistenkas de inventario, que reciben el nombre de **costo de operación del sistema.** Este costo puede ¡ser grande; incluye, por ejemplo, el costo de computadoras y programas para el control del inventario. Irónicamente, la mayoría de los modelos de inventarios se desarrollaron antes o muy al principio de la era de las computadoras y este costo con frecuencia no se tomaba en cuenta.

1.4 Medidas de efectividad

El inventario es, en términos básicos, una entidad de servicio. Si el inventario satiface la demanda cuando ocurre, entonces el servicio es perfecto; de otra manera hay problemas con el servicio. Proporcionar un alto nivel de servicio no es gratis. El estudio de los sistemas de inventarios es un análisis de trueques entre los beneficios y los costos de mantenerlos. La meta es maximizar los beneficios al mismo tiempo que se minimiza el costo, una difícil misión. Esa meta es aún más compleja cuando el inventario contiene muchos artículos diferentes.

Primero se estudian los costos; los beneficios se ven como un costo de oportunidad. Más adelante se examinan los modelos que hace alusión al beneficio de los servicios. Existen dos enfoques para medir la efectividad, un enfoque de modelado y un enfoque gerencial.

El **enfoque de modelado** optimiza el sistema de inventarios. El criterio que se emplea en la mayoría de los modelos es minimizar el costo; aunque, en principio, también se podría usar maximización. Estos criterios son equivalentes para la mayoría de los sistemas de inventario, porque la ganancia es la diferencia entre el precio y el costo. Aquí se estudian los modelos de costo porque son más sencillos. Otra razón es que mientras que el costo es un *hecho,* los precios son una *política.* Los costos se conocen y los precios pueden diferir por políticas administrativas o por presión del mercado.

Una medida de efectividad común para los sistemas de inventario es el *costo total promedio mínimo por unidad de tiempo.* Una unidad de tiempo puede ser días, semanas, meses o años. El costo total incluye los elementos de costo que se definieron. Se usa el promedio porque los costos de almacenaje y faltantes son proporcionales al nivel de inventario que puede variar durante el periodo. Para calcular el costo total promedio se promedia el inventario o los faltantes en el tiempo y se multiplican por h o $\tilde{n}$.

El **enfoque gerencial** casi siempre se usa para sistemas de inventarios de múltiples artículos. La meta inmediata es reportar el tamaño del inventario a la gerencia. Una medida del tamaño del inventario es la inversión total en la fecha del reporte. Se multiplica la cantidad disponible de cada artículo por su costo y se suma el resultado para todos los artículos. Para obtener una medida relativa sobre si se tiene "demasiado" o "muy poco" inventario o para comparar el desempeño con los "estándares industriales" y con el de los competidores se usan otras dos medidas:

$$\text{Meses de abastecimiento} = \frac{\text{Inversión en inventario total}}{\text{Demanda promedio pronosticada (\$/mes)}}$$

$$\text{y Rotación del inventario anual} = \frac{12\ [\text{demanda promedio pronosticada (\$ / mes)}]}{\text{Inversión en inventario total}}$$

La primera medida indica cuánto tiempo se podrá satisfacer la demanda futura con el inventario disponible; la segunda indica la rapidez de rotación del inventario; mientras más alto sea el valor, más baja será la inversión en inventario. Estas medidas cambian un poco con los diferentes objetivos y con los tipos de inventario (materia prima, producto terminado). Para verificar el desempeño futuro, se usa el pronóstico de demanda y para la evaluación del desempeño pasado se usa la demanda real. Una manera rápida de calcular la rotación del inventario a partir de la hoja de balance de una compañía es

$$\text{Rotación de inventario} = \frac{\text{Valor de las ventas}}{\text{Valor de Inventario}}$$

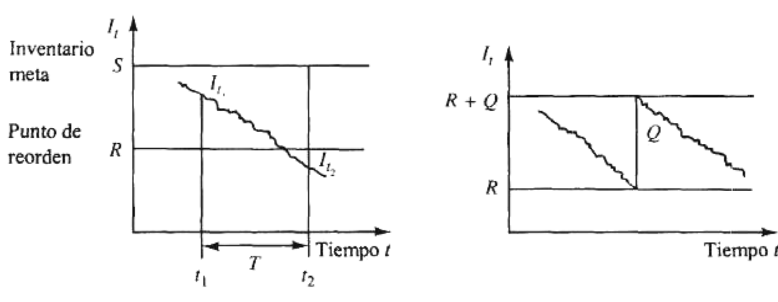


FIGURA 6-1
Política de revisión periódica

FIGURA 6-2
Política de revisión continua

La comparación de esta cifra con la rotación para otras compañías o los estándares industriales da una indicación del desempeño de la operación del inventario.

1.5 Políticas de inventario

El elemento principal que afecta el inventario es la demanda. Desde el punto de vista del control de la producción, se supone que la demanda es una variable incontrolable. Existen! tres factores importantes en un sistema de inventario, llamados variables de decisión, que se pueden controlar:

¿Qué debe ordenarse? (decisión de variedad)
¿Cuándo debe ordenarse? (decisión de tiempo)
¿Cuánto debe ordenarse? (decisión de cantidad)

Para entender mejor estas decisiones de inventarios, se examina un sistema de un solo artículo. La decisión de variedad es irrelevante y las otras dos se toman usando dos políticas de control de inventarios diferentes, conocidas como de revisión periódica y de revisión dontinua.

Política de revisión periódica. Se verifica el nivel del inventario /, en intervalos de tiempo fijo, digamos una semana, un mes o cualquier tiempo *T*, llamado periodo de revisión, y pe coloca una orden si / es menor que cierto nivel predeterminado i?, llamado punto de reorden (decisión de tiempo). El tamaño de la orden *Q* es la cantidad requerida para aumentar el inventario a un nivel predeterminado *S* (decisión de cantidad). El tamaño de *Q* varía de un periodo a otro. La figura 6-1 presenta esta política suponiendo que la demanda es de una unidad a la vez y que las órdenes se entregan instantánemente. En t_x el nivel del inventario está por arriba del punto de reorden i?,por lo que no se ordena. En el siguiente tiempo de revisión t_2, *T*periodos después de t_x, $I, < R$ y se ordenan$Q = S - I,$ unidades. Con frecuencia se hace referencia a esta política como política periódica o política de tiempo fijo.

Política de revisión continua. En esta política el nivel del inventario se controla continuamente. Cuando el nivel llega al punto de reorden *R* (decisión de tiempo), se ordena iina cantidad fija*Q*(decisión de cantidad). Ésta es una política continua *(Q, R),o* política de cantidad fija de reorden. La figura 6-2 presenta esta política suponiendo entrega instantánea de la orden y demanda de una unidad a la vez.

Antes de la era de las computadoras, los sistemas de revisión periódica eran más populares porque su manejo manual era más sencillo. Con las computadoras disponibles en cualquier parte, la implantación de las políticas de revisión continua se ha facilitado. La revisión continua tiene ciertos méritos sobre la revisión periódica; sin embargo, esta última todavía tiene un lugar, como se verá cuando se estudien las decisiones de control (sección 4.2).

1.6 Relevancia de los modelos de inventarios

Muchos modelos de inventarios clásicos se desarrollaron en la era de las teorías clásicas de la administración. En el capítulo 2 se estudió la teoría emergente que lleva a la manufactura de clase mundial y que toma un punto de vista sobre el inventario completamente distinto: reducir el inventario todo lo que se pueda, en lugar de optimizarlo. Así, existe un dilema al presentar muchos de los modelos clásicos. Si a la luz de las nuevas teorías de producción son obsoletos, ¿por qué enseñarlos? La respuesta de los autores es que pensamos que son tan relevantes en el "nuevo ambiente" como lo fueron antes.

Pensamos que aun en el pasado, una de las mayores ventajas de los modelos de inventarios era la visión que proporcionaban. De cientos de modelos de inventarios desarrollados, el que más se ha usado es el modelo del lote económico (EOQ), que se desarrolló ¡en 1915! Un gran beneficio que se obtiene al usar diferentes modelos de sistemas de inventarios es la comprensión del comportamiento de estos sistemas, las relaciones entre los diferentes parámetros y variables y la sensibilidad respecto a las inexactitudes en los datos. Esta comprensión prevalecía en el pasado y será muy importante en el futuro. Por ejemplo, en un sistema de inventarios real con 100 000 artículos es difícil calcular y actualizar el costo por faltante para cada artículo. Sin embargo, al entender el impacto del costo por faltantes a partir de los costos que se obtienen en los modelos, los sistemas de inventarios se administran mejor. Otro ejemplo es la reducción del tiempo de preparación; sus implicaciones se pueden estudiar y entender usando modelos de inventarios.

Aun hoy, el inventario no es un mal. Para ilustrar, la planta GM Saturn opera uno de los sistema de justo a tiempo (sin inventario) más exigentes en Estados Unidos (Woodruff *et al*, 1992). Pero encontraron que era necesario agregar más inventario entre departamentos como un amortiguador, para que fuera menos probable que se retrasara el ensamble final.

Como se ha establecido, los modelos de inventario clásicos son importantes no sólo por los resultados que se obtienen, sino también por el mayor entendimiento del comportamiento del sistema. El ingeniero industrial o el administrador de operaciones del futuro debe entender los modelos clásicos con el fin de ayudar a desarrollar los modelos futuros.

Este capítulo está orientado a las decisiones y dividido en tres áreas principales: decisiones de cantidad, decisiones de tiempo y decisiones de control. El siguiente capítulo analiza los sistemas de demanda dependiente.

SECCIÓN 1 EJERCICIOS

6.1. Utilice la definición de inventario para clasificar las siguientes entidades como "inventario" o "sin inventario". Explique

- Mercancía en una tienda

- Agua en un depósito
- Dinero en una cuenta de ahorros
- Árboles en un bosque
- Troncos cortados en una fábrica de pulpa
- Cuerdas de alambre para puentes
- Barras de acero en una fábrica metalúrgica
- Una mina de hierro
- Brandy en barriles en una destilería
- Botella de brandy en casa

6.2. Enumere y explique unos cuantos factores exógenos que contribuyan a la necesidad de inventario.

6.3. Sponga que la demanda de un producto se conoce con certidumbre. ¿Todavía se requiere un in ventario? ¿Por qué? Proporcione un ejemplo.

6.4. Considere un producto como una bicicleta que se está fabricando. Haga un bosquejo sencillo de ese producto e identifique lo siguiente:

a) Artículos con demanda independiente y dependiente
b) Inventario de materia prima
c) Inventario en proceso
d) Inventario de productos terminados

6.5. Un embotellador de refrescos sabe que el desglose de sus costos es el siguiente:

- Costo de materia prima para un galón de refresco, $ 1.80
- Costo de embotellado para un galón de refresco, $ 1.20
- Costo de una botella vacía de 1/12 galón, $0.05
- Costo de preparación para una corrida de embotellado $5000
- Costo de mantener inventario, 35% anual

a) Evalúe *c,* el costo total unitario de producción.
b) ¿Cuál es el costo total de producción para tamaños de lote de 1000,10 000,50 000 y 100 000 botellas de 1/12 galón?
c) Sea

$$\frac{A}{A + cQ} = y$$

Grafique $y = f(Q)$. ¿Qué puede concluir?

d) La compañía estima la demanda en 10 000 botellas diarias. La política es tener un inventario de producto terminado correspondiente a 5 días de demanda. ¿Cuál es la inversión en este inventario?
é) Evalúe el costo de mantener el inventario en dólares por año.

6.6. La compañía A tiene $10 millones en inventario, el equivalente al abasto de tres meses. La com pañía B, que está en la misma línea de negocios, tiene $5 millones en inventario el equivalente a una rotación de inventario de 4 (esto es, cuatro ciclos de inventario por año). Analice esta situa ción.

6.7. Una hoja de balance tiene siempre un elemento de "bienes actuales", que representa la inversión en inventario. La OPCABLE Company fabrica cables de fibra óptica. Su hoja de balancje para el 31 de diciembre de 1996 mostraba un rendimiento total de $50 millones y bienes actuales por $10 millones.

á) Dé un aproximado de los meses de abasto y la rotación del inventario para este año. *b)* Si el "estándar de la industria" es de seis rotaciones de inventario anuales, ¿qué puede decirle a la administración de OPCABLE?

6.8. La OPCABLE Company hizo un análisis de costos de sus sistemas de materiales y obtuvo los siguientes datos para los últimos seis meses. Calcule el costo total promedio por mes.

Mes	Costo de ordenar ($1000)	Costo de almacenar ($1000)	Costo de compra ($ millones)
1	5	200	5
2	8	180	4
3	6	220	6
4	7	170	2
5	—	190	—
6	4	180	5

6.9. Tres compañías en la industria electrónica tienen los siguientes ciclos de inventario:

Compañía A 6
Compañía B 8
Compañía C 4

¿Qué compañía tendrá el menor costo de mantener inventario? Explique por qué.

6.10. Considere las tres variables de decisión en los sistemas de inventarios. Analice las relaciones en tre ellos.

6.11. Compare las dos políticas de revisión de inventarios para los casos de ambientes de demanda determinística y estocástica.

6.12. Además de las dos políticas de revisión de inventario "puras", puede haber una política "híbrida".

a) Dé un ejemplo en el que una política híbrida sea útil.
b) Muestre la gráfica para una política "híbrida" (como las de las figuras 6-1 y 6-2).

6.13. Las siguientes situaciones representan ambientes "tipo inventario" que se encuentran en la vida diaria. Clasifíquelas según si, por implicación, usan una política de revisión periódica o continua. Explique.

- El tanque de gasolina de un automóvil
- El dinero en una cuenta de cheques
- Los alimentos en un refrigerador
- Las botellas de vino en una cava
- El aceite del motor de un vehículo

6.14. La compañía METCUT lo contrató para trabajar en su departamento de costos. Ellos acaban de comprar un nuevo paquete de software para inventarios y, entre otras cosas, tienen que darle el va lor de A. Su primera tarea es obtener este valor usando los registros históricos, con los siguientes datos.

1.	Costo de preparación de equipo	$200
2.	Costo de carga/descarga por artículo	$1.80
3.	Corrida inicial de prueba por lote	$15/lote
4.	Costo de preparación de una orden de producción por lote, tiempo estándar y dibujos	$120
5.	Costo de capital	25% anual
6.	Costo de manejo de una unidad	$2/unidad

2 DECISIONES DE CANTIDAD

Esta sección analiza una de las decisiones más importantes relacionadas con los sistemas de inventarios: la decisión de cantidad (es decir, cuánto ordenar). Esta decisión tiene un impacto considerable a nivel del inventario que se mantiene y, por esto, influye directamente en ios costos de inventario.

Se presentan los modelos más comunes desarrollados a lo largo de muchos años y se analizan juntos para proporcionar un panorama claro de lo que se ha hecho. El factor común de estos modelos es que manejan una demanda conocida y un solo artículo (excepto por la parte de la sección 2.1.4 que cubre modelos de varios artículos restringidos en recursos) y todos se pueden extender a un ambiente de artículos múltiples, si no hay dependencia entre ellos. Más aún, se pueden aplicar en un ambiente de producción al igual que en otros ambientes, tales cojno ventas al menudeo. Con algunos ajustes, se aplican a inventarios de materia prima, productos terminados y en algunos casos a inventarios de PEP.

Por lo general, los modelos para decisiones de cantidad se llaman modelos de tamaño de lote. Existen muchos de ellos, aquí se agruparon bajo dos grandes rubros:

- **Modelos estáticos de tamaño de lote** que se usan para demanda uniforme (constante) du rante el horizonte de planeación.
- **Modelos dinámicos de tamaño de lote** que son modelos empleados para cambiar la de manda durante el horizonte de planeación. Se supone que la demanda es conocida con cer tidumbre, lo que en ocasiones se llama *demanda irregular*.

Es posible una subclasificación; la estructura general de esta sección y los modelos analizados aparecen en la figura 6-3.

2.1 Modelos estáticos de tamaño de lote

Un ambiente de demanda constante y uniforme no es común en el mundo real. Sin embargo, es un punto de inicio conveniente para desarrollar modelos de inventarios y lograr entender las relaciones dentro de un sistema de inventarios. Se desarrollan cuatro modelos en esta Categoría (vea la figura 6-3).

2.1.1 Cantidad económica a ordenar (EOQ)

Éste es el modelo fundamental de los modelos de inventarios; Harris los introdujo en 1915. También se conoce como la fórmula de Wilson, ya que fue él quien promovió su uso. La importancia de este modelo es que todavía es uno de los modelos de inventarios que más se usan en la industria, y sirve como base para modelos más elaborados.

Se supone el siguiente ambiente para la toma de decisiones:

- Existe un solo artículo en el sistema de inventario.
  La demanda es uniforme y determinística y el monto es de D unidades por unidad de tiempo —día, semana, mes o año—. Se usará la demanda anual, pero puede ser cualquier otra unidad, siempre y cuando el resto de los parámetros se calculen en la misma unidad de tiempo.

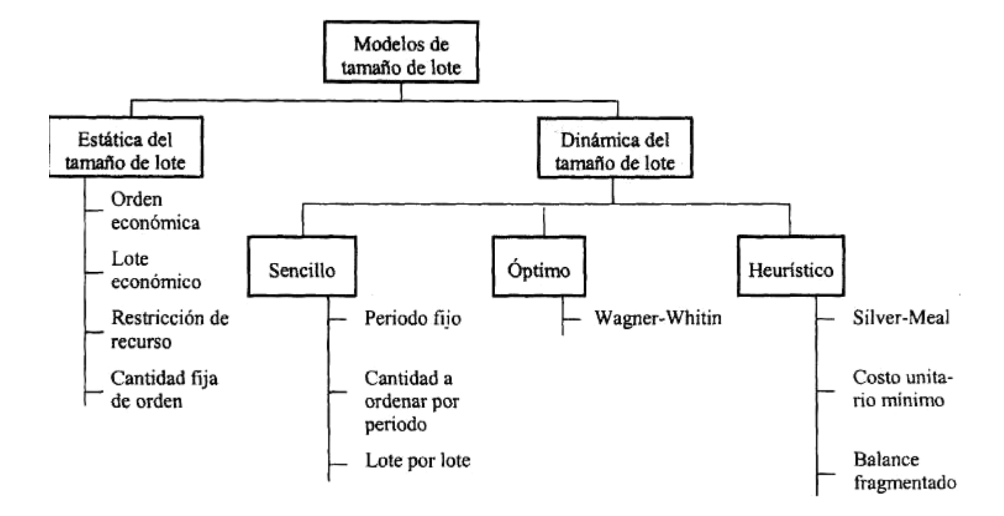


FIGURA 6-3
Clasificación de los modelos de tamaño de lote

- No se permiten faltantes.
- No hay un tiempo de entrega (tiempo desde que se coloca la orden hasta que se recibe).
- Toda la cantidad ordenada llega al mismo tiempo; esto se llama tasa de reabastecimiento infinito.

Este modelo es adecuado para la compra de materia prima en producción o para el ambiente de ventas al menudeo. La variable de decisión para este modelo es Q, el número de unidades a ordenar, un número entero positivo. Los parámetros de costo se conocen con certidumbre y son los siguientes:

c = costo unitario ($/unidad)

i = costo total anual de mantener el inventario (% por año)

h = ic - costo total anual de mantener el inventario ($ por unidad por año)

A = costo de ordenar ($/orden)

Además, se define

D = demanda por unidad de tiempo

T = longitud de ciclo, el tiempo que transcurre entre la colocación (o recepción) de órdenes sucesivas de abastecimiento $K(Q)$ = costo total anual promedio como una función del tamaño de lote Q

I_t = inventario disponible en el tiempo t (cantidad real de material que hay en almacén)

El concepto básico de este modelo es crear un balance entre dos costos opuestos, los costos de ordenar y los costos de almacenar. El costo de ordenar es un costo fijo; si se ordena más, el costo por unidad será menor. El costo de almacenar es un costo variable que disminuye si el inventario que se tiene disminuye. Este balance se logra minimizando $K(Q\$ el costo total anual promedio.

Una herramienta útil al analizar los sistemas de inventarios es la *geometría del inventario,* una descripción gráfica de /;, que se muestra en la figura 6-4.

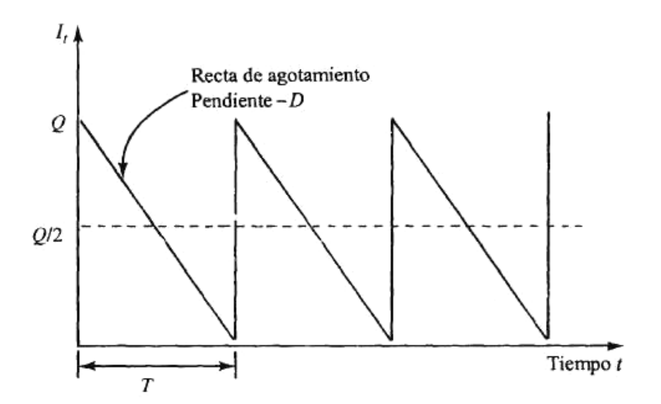


FIGURA 6-4
Geometría del inventario EOQ

Se supone que el nivel de inventario es Q en el tiempo cero. Cuando pasa el tiempo, el inventario se agota a una tasa de D unidades por año (es decir, la pendiente de la recta del inventario es *-D).* Cuando el nivel de inventario llega a cero, se ordenan *Q*unidades. Como s|e supone que el tiempo de entrega es cero y la tasa de reabastecimiento es infinita, el nivel de inventario se elevará a Q de inmediato y el proceso se repetirá. Debido a la geometría del inventario, en ocasiones este método se llama modelo de diente de sierra.

Este patrón se llama un ciclo y puede haber varios ciclos en un año. Sea T la lorigitud del ciclo del inventario. De la geometría del inventario se observa que

$$T = \frac{Q}{D}$$

Sea $\bar{I}$ el inventario promedio. De la figura 6-4 se tiene

$$\bar{I} = \frac{\text{Área bajo la curva de inventario}}{T}$$

o

$$\bar{I} = \frac{\text{Área del triángulo del inventario}}{T} = \frac{1}{T}\frac{QT}{2} = \frac{Q}{2}$$

Este resultado se puede obtener de manera intuitiva, ya que el nivel del inventario fluctúa entre *OyQ,* por lo que el promedio *esQ/2.* El nivel máximo de inventario es

$$\text{Uc} = Q$$

Existen tres tipos de costos: costo de compra, costo de ordenar y costo de mantener inventario. Para *cada ciclo,* los costos son

$$cQ = \text{costo de compra}$$
$$A = \text{costo de ordenar (o de preparación)}$$
$$icT\frac{Q}{2} = hT\frac{Q}{2} = \text{costo promedio de mantener el inventario}$$

Así, el costo promedio por *ciclo* es

$$cQ + A + hT\frac{Q}{2}$$

Observe que en lo anterior, *h T* es el costo de mantener una unidad en inventario durante *T* unidades de tiempo.

Para obtener el costo promedio anual *K(Q)*, se multiplica el costo promedio por ciclo por el número de ciclos, que es *l/T.* Se obtiene

$$K(Q) = \frac{cQ}{T} + \frac{A}{T} + h\frac{Q}{2}$$

Como *í/T = D/Q*, el costo total anual promedio es

$$K(Q) = cD + \frac{AD}{Q} + h\frac{Q}{2}$$

Se quiere encontrar el valor de la variable de decisión *Q* que minimiza *K(Q).* Esto se logra resolviendo la ecuación

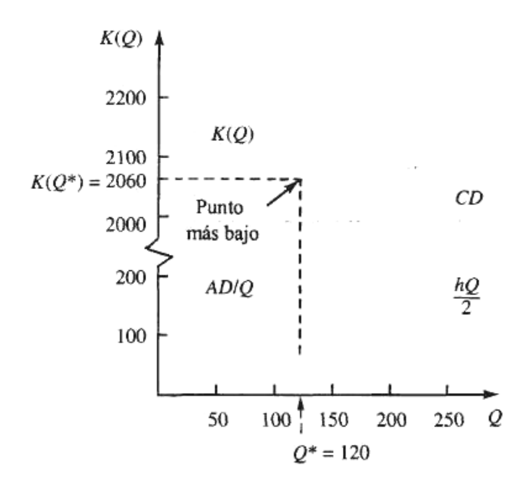
$$K'(Q) = \frac{dK(Q)}{dQ} = -\frac{AD}{Q^2} + \frac{h}{2} = 0$$

Como la segunda derivada de *K{Q)* es positiva, *K(Q)es* una función convexa y alcanza su mínimo en el punto donde la derivada es cero. Al resolver la ecuación anterior se llega a

$$Q^* = \sqrt{\frac{2AD}{h}}$$

*Q*se* conoce como la cantidad económica a ordenar o lote económico o EOQ.

La figura 6-5 es una descripción gráfica de *K(Q).* La curva de *K{Q)* es la suma de tres curvas individuales, que representan las componentes de la función *K(Q). Q** ocurre en el punto de intersección de las curvas para *hQ/2 y AD/Q;* ahí es donde se balancean los dos costos opuestos, el costo de ordenar y el costo de mantener el inventario. (En general, el mínimo de la



Un bosquejo de *K(Q)* para el ejemplo 6-1

suma de las dos funciones no tiene que ocurrir en la intersección.) El costo de compra anual cD no afecta el valor de Q^*.

Al sustituir el valor de Q^* en $K(Q)$, y después de algunas manipulaciones algebraicas, se obtiene el costo total anual promedio mínimo:

$$K(Q^*) = cD + \sqrt{2ADh}$$

El costo anual de ordenar (de preparación) es AD/Q^* y el costo anual de almacenar es $h(Q^*/2)$.

Ejemplo 6-1. Lote económico. Un pequeño taller de soldadura usa varillas para soldar ¡i una tasa uniforme. Marvin, el dueño, compra las varillas a un proveedor local. Él estima que la demanda anual es de alrededor de 1000 libras. Para colocar una orden, tiene que gastar cerca de $3 60 por la llamada telefónica y el papeleo. Marvin paga $2 por libra de varilla y sus costos de almacenaje están basados en una tasa anual de 25%. Analice el sistema.

Solución. Pimero se identifican los parámetros.

A = $3.60 por orden D =
1000 libras por año c = $2
por libra i = 25% anual
h = 0.25 x $2 = $0.5 por libra por año

El tamaño del lote económico es

$$Q^* = \text{EOQ} = \sqrt{\frac{2AD}{h}} = \sqrt{\frac{(2)(3.6)(1000)}{0.5}} = 120$$

Es mejor para Marvin ordenar 120 libras. Él debe colocar una orden cada $T = 120/1000 = 0.12$ años, es decir, 1.44 meses. El costo total anual promedio es

$$K(Q^*) = cD + \sqrt{2ADh} = (2)(1000) + \sqrt{(2)(3.6)(1000)(0.5)} = \$2060$$

El costo anual de ordenar es $AD/Q^* = (3.6 \times 1000)/120 = \$30$. El costo anual de mantener el inventario es $hQ^*/2 = (0.5 \times 120)/2 = \$30$.

El hecho de que los costos anuales de almacenar y de ordenar sean iguales no debe sorprender. Se demostró que el óptimo se encuentra en la intersección de las dos curvas. Este problema también se puede resolver sobre la base de cantidades mensuales o semanales. Se sugiere al estudiante que intente esto como práctica adicional.

La suposición de un tiempo de entrega de cero es limitante, pero se relajará cuando se analicen las decisiones de tiempo (sección 3). Otras extensiones de la fórmula del EOQ incluyen la sensibilidad de $K(Q^*)$a. los errores enQ^* y a la ampliación de la suposición de que no se admiten faltantes.

Sensibilidad de $K(Q^*)$. En el mundo real en ocasiones no es práctico ordenar exactamente Q^* unidades. Suponga, por ejemplo, que Q^* = 1357y que el artículo de interés vien; en cajas de 1000 unidades cada una. ¿Deben ordenarse una o dos cajas? Esta pregunta lleva a examinar

la sensibilidad de la función $K(Q)$ a las desviaciones de Q respecto al valor óptimo Q^*. Esta sensibilidad se mide con la razón

$$\frac{K(Q)}{K(Q^*)}$$

Cuando no hay desviación ($Q = Q^*$),el valor de esta razón es 1. Para facilidad de cálculo, se ignora el costo de compra cD en esta razón, ya que no cambia la forma general de la curva de costo sino simplemente la mueve hacia arriba una cantidad cD. Se obtiene

$$\frac{K(Q)}{K(Q^*)} = \left(\frac{\frac{AD}{Q} + h\frac{Q}{2}}{\sqrt{2ADh}} \right) = \frac{1}{2Q}\sqrt{\frac{2AD}{h}} + \frac{Q}{2}\sqrt{\frac{h}{2AD}}$$

$$= \frac{Q^*}{2Q} + \frac{Q}{2Q^*} = \frac{1}{2}\left[\frac{Q^*}{Q} + \frac{Q}{Q^*}\right]$$

La descripción gráfica de esta función aparece en la figura 6-6. La forma de esta gráfica sugiere que colocar una orden más grande que Q^* (es decir, $Q/Q^* > 1$) costará menos que una orden más pequeña por la misma cantidad.

Ejemplo 6-2. Sensibilidad de los EOQ. Suponga que las varillas de soldadura del ejemplo 6-1 se ordenan en paquetes de 75 libras cada uno. ¿Cuántos paquetes debe ordenar Marvin?

Solución. En el ejemplo 6-1, el lote económico es 120 libras y la nueva cantidad a ordenar debe ser un paquete (75 libras) o dos (150 libras). Si se aplica el análisis de sensibilidad se obtiene

$$\frac{K(Q)}{K(Q^*)} = \frac{1}{2}\left[\frac{Q}{Q^*} + \frac{Q^*}{Q}\right]$$

1. Se establece $Q = 75$; entonces

$$K(75)/K(120) = (1/2)(75/120 + 120/75) = 1.1125$$

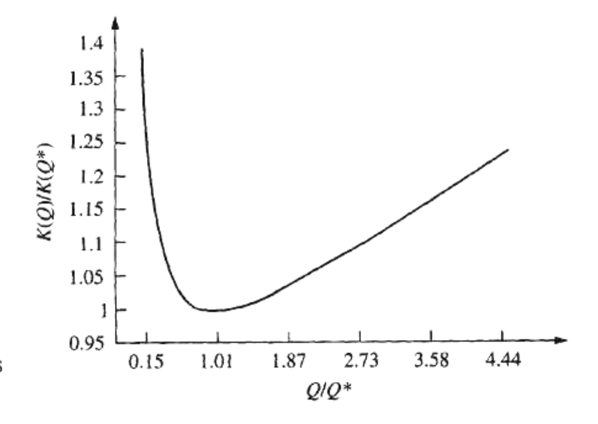


FIGURA 6-6
Análisis de sensibilidad del EOQ a valores de Q

2. Se establece Q = 150; entonces

A: (150)/A: (120) = (1/2x150/120+ 120/150) = 1.025

Marvin tendrá mejores resultados si ordena dos paquetes cada vez. En la figura 6-6 se da la descripción gráfica de *K(Q)/K(Q*)*, suponiendo que las varillas se pueden comprar una a la vez.

2.1.2 Cantidad económica a producir (EPQ) con extensiones

Esta extensión del modelo EOQ relaja la suposición de una tasa de reabastecimiento infinita. En su lugar se tiene una tasa finita, que es lo normal para artículos fabricados, en donde el lote se entrega a través del tiempo de acuerdo con la tasa de producción.

También se permite que ocurran faltantes y se cumplan las órdenes atrasadas, suponiendo que existe un nivel mínimo de atraso que la administración está dispuesta a tolerar. Los faltantes ocurren en los sistemas de producción debido a falta de material, falta de capacidad o ambas. Recuerde que un faltante tiene dos costos asociados, *n* y *n* (sección 1.3). Como *n* es para el faltante lo que *h* es para el inventario, se evalúa de la misma manera, considerando el faltante promedio. Como *n* es el costo por faltante (sanción), se necesita conocer el faltante máximo para evaluarlo. Sea

i = tasa de producción, medida en las mismas unidades que la demanda *Q*
= tamaño del lote de producción *A* = costo de preparación c = costo
unitario de producción *B*, = nivel de faltante (orden atrasada) en el tiempo
t B = nivel promedio de faltantes *b = máxB*,

La geometría del inventario para este caso se muestra en la figura 6-7.

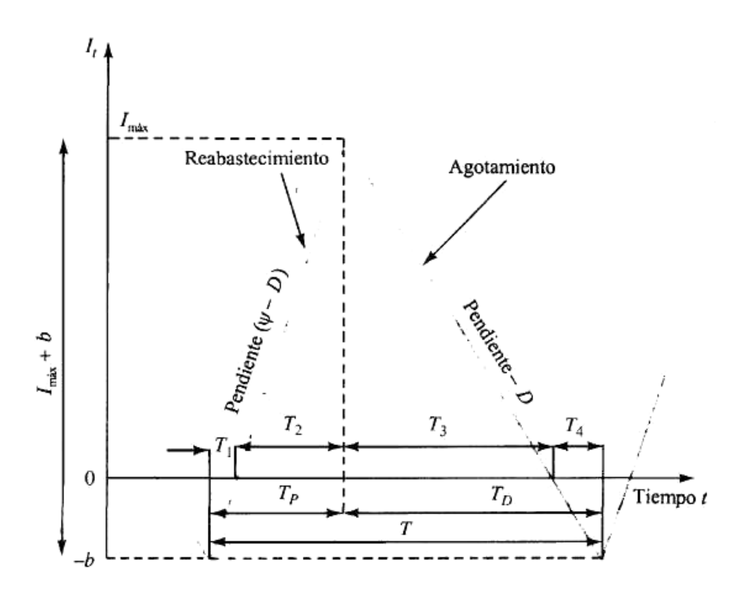
Se supone que en el tiempo cero el nivel de inventario es -*b*. En este punto se emite una orden de producción por *Q* unidades y como el tiempo de entrega es cero, la producción comienza de inmediato. La tasa de producción es i|/,pero como al mismo tiempo hay una demanda, la tasa de reabastecimiento neta es iy - *D* y la recta de reabastecimiento tiene una pendiente positiva. Una vez que se han fabricado *Q* unidades, el inventario alcanza su valor máximo, $/_{máx}$, y la producción se detiene. El inventario se agota a la tasa de la demanda *D*. Cuando el nivel de inventario alcanza -*b*, la producción se reanuda y el ciclo se repite.

Siguiendo un procedimiento básico similar al del caso del lote económico:

$$T = \frac{Q}{D} \qquad \text{tiempo de ciclo}$$

$$T_p = \frac{Q}{\Psi} \qquad \text{tiempo para producir } Q \text{ unidades}$$

$$T_D = \frac{I_{\text{máx}}}{D} \qquad \text{tiempo para agotar el inventario máximo}$$



Geometría del inventario: EPQ con faltantes

De la geometría del inventario:

$$I_{máx} + b = T_p(\psi - D) = \frac{Q}{\psi}(\psi - D) = Q\left(1 - \frac{D}{\psi}\right)$$

o

$$I_{máx} = Q\left(1 - \frac{D}{\psi}\right) - b$$

El inventario disponible es positivo durante $T_2 + T_3$, mientras que los faltantes se surten durante $T_{\{}$ y T_4. La producción se lleva a cabo durante $T_p = T_x + T_2$, mientras que el agotamiento del inventario ocurre durante $T_D = T_3 + T_4$. De la geometría del inventario se obtiene

$$T_1 = \frac{b}{\psi - D} \quad \text{tiempo para recuperarse del faltante}$$

$$T_2 = \frac{I_{máx}}{\psi - D} \quad \text{tiempo para generar } I_{máx}$$

$$T_3 = \frac{I_{máx}}{D} \quad \text{tiempo para agotar } I_{máx}$$

$$T_4 = \frac{b}{D} \quad \text{tiempo para generar el faltante de } b$$

Para obtener la ecuación para *K (Q, b),se* necesitan *IyB.* Ambos se obtienen de la geometría del inventario. De nuevo, éstos son promedios por ciclo.

que después de introducir los términos para $7_{máx}$,$T_2 y T_3$ lleva a

$$\bar{I} = \frac{\left[Q\left(1 - \frac{D}{\psi}\right) - b\right]^2}{2Q\left(1 - \frac{D}{\psi}\right)}$$

Además,

$$\bar{B} = \frac{1}{2T} b(T_1 + T_4)$$

e introduciendo los términos para T_1 y T_4 se obtiene

$$\bar{B} = \frac{b^2}{2Q\left(1 - \frac{D}{\psi}\right)}$$

El costo promedio anual de mantener el inventario es

$$\frac{1}{T}(hT\bar{I}) = h\bar{I} = \frac{h\left[Q\left(1 - \frac{D}{\psi}\right) - b\right]^2}{2Q\left(1 - \frac{D}{\psi}\right)}$$

El costo total por faltantes por ciclo es

$$\pi b + \hat{\pi} T\bar{B}$$

y el costo promedio anual por faltantes es

$$\frac{1}{T}[\pi b + \hat{\pi} T\bar{B}] = \frac{\pi bD}{Q} + \frac{\hat{\pi} b^2}{2Q\left(1 - \frac{D}{\psi}\right)}$$

El costo total anual promedio es

$$K(Q, b) = cD + \frac{AD}{Q} + \frac{h\left[Q\left(1 - \frac{D}{\psi}\right) - b\right]^2}{2Q\left(1 - \frac{D}{\psi}\right)} + \frac{\pi bD}{Q} + \frac{\hat{\pi} b^2}{2Q\left(1 - \frac{D}{\psi}\right)}$$

Para encontrar Q^* y b^* se resuelven las dos ecuaciones

$$\frac{\partial K}{\partial Q} = 0 \quad \text{y} \quad \frac{\partial K}{\partial b} = 0$$

Con $\hat{\pi} \neq 0$, la solución de estas dos ecuaciones lleva a

$$Q^* = \sqrt{\frac{2AD}{h\left(1 - \frac{D}{\psi}\right)} - \frac{(\pi D)^2}{h(h + \hat{\pi})}} \sqrt{\frac{h + \hat{\pi}}{\hat{\pi}}}$$

y

$$b^* = \frac{(hQ^* - \pi D)\left(1 - \dfrac{D}{\psi}\right)}{(h + \hat{\pi})}$$

Para obtener *K(Q*, b*),* se sustituyen *Q** y *b** en AT(0, *b).*

Si 7i = 0, *Q** y ¿>* tendrán valores positivos finitos. Si Tí > OyTi es suficientemente grande, se puede obtener un valor negativo en el denominador del radical en *Q*.* En este caso no deben permitirse faltantes, es decir, *b* = 0. Sin* = 0 y *n* > 0, se puede demostrar que la política óptima es no permitir faltantes o no almacenar el artículo. En el último caso, toda la demanda se va a órdenes atrasadas antes de satisfacerla. En el ambiente de manufactura esto se llama producir por pedido.

Ej emplo 6-3. EPQ con faltantes. SuperSauce produce un aderezo de ensalada. La demanda de este aderezo es alrededor de 400 libras por mes y SuperSauce puede fabricarlo a una tasa de 2000 libras por mes. Para iniciar la producción, tienen que verificar y limpiar las máquinas en forma exhaustiva y cada preparación cuesta $ 120. El costo de producir este aderezo es $3 por libra y el costo de mantenerlo en inventario se estima en 20% anual. Si la demanda de este aderezo excede a lo disponible en inventario la orden se surte después. La administración piensa que los faltantes incurren en dos tipos de costo, la pérdida de buena voluntad y una sanción por el faltante. La pérdida de la buena voluntad se estima en $0.1 por libra que falta y la sanción se estima en $ 1.2 por libra que falta por mes. Analice este problema.

Solución. Los parámetros del problema son

A = $120 por preparación
/ = 20% anual
c = $3 por libra
h = 0.2 x $3 == $0.6 por libra por año
it - $0.1 por libra
ít = $1.2 por libra por mes = $14.4 por libra por año
D = 400/mes = 4800/año
i = 2000/mes = 24 000/año

El costo total anual de inventario es

$$K(Q, b) = cD + \frac{AD}{Q} + \frac{h\left[Q\left(1 - \dfrac{D}{\psi}\right) - b\right]^2}{2Q\left(1 - \dfrac{D}{\psi}\right)} + \frac{\pi b D}{Q} + \frac{\hat{\pi} b^2}{2Q\left(1 - \dfrac{D}{\psi}\right)}$$

y la cantidad económica a producir es

$$Q^* = \sqrt{\frac{2AD}{h\left(1 - \dfrac{D}{\psi}\right)} - \frac{(\pi D)^2}{h(h + \hat{\pi})}}\sqrt{\frac{h + \hat{\pi}}{\hat{\pi}}}$$

$$= \sqrt{\frac{(2)(120)(4800)}{(0.6)\left(1-\frac{4800}{24\,000}\right)} - \frac{[(0.1)(4800)]^2}{(0.6)(0.6+14.4)}}\sqrt{\frac{0.6+14.4}{14.4}}$$

$$= 1605$$

El máximo nivel de faltantes óptimo es

$$b^* = \frac{(hQ^* - \pi D)\left(1-\frac{D}{\psi}\right)}{(h+\hat{\pi})}$$

$$= \frac{[(0.6)(1605)-(0.1)(4800)]\left(1-\frac{4800}{24\,000}\right)}{(0.6+14.4)}$$

$$= 25.76 = 26$$

El tamaño del lote económico es 1605 libras, el nivel máximo de órdenes atrasadas es 26 ibras y la producción toma 4800/24 000 = 20% del tiempo. El costo total anual del inventario es

$$K(Q^*, b^*) = K(1605, 26) = (3)(4800) + \frac{(120)(4800)}{1605}$$

$$+ \frac{(0.6)\left[(1605)\left(1-\frac{4800}{24\,000}\right)-26\right]^2}{(2)(1605)\left(1-\frac{4800}{24\,000}\right)} + \frac{(0.1)(25)(4800)}{1605}$$

$$+ \frac{(14.4)(26)^2}{(2)(1605)\left(1-\frac{4800}{24\,000}\right)} = \$15\,136$$

Del modelo EPQ con faltantes se obtienen dos casos especiales, EPQ sin faltantjes y EOQ con faltantes.

En este caso, se prohiben los faltantes estableciendo el costo por faltantes como infinito. Es obvio que no se planean faltantes para este so, por lo *cí* que $b = 0$. Las ecuaciones de costo se convierten en

$$K(Q) = cD + \frac{AD}{Q} + \frac{hQ}{2}\left(1-\frac{D}{\psi}\right)$$

haciendo $b = 0$ en la ecuación de costo anterior. De la misma manera se obtiene

$$Q^* = \sqrt{\frac{2AD}{h\left(1-\frac{D}{\psi}\right)}}$$

En este caso el valor de Q^* es mayor que en el caso EOQ, porque (1 - *D/\\i)* < 1. Sin embargo, el valor de 7 es menor que antes, debido a que en un periodo se combina el abastecimiento con el agotamiento. El término (1 - *D¡\\i)* es la tasa de abasto *efectiva.* Observe cue cuando *\\i* -» oo, se obtiene el EOQ.

Ejemplo 6-4. Lote económico de producción. La compañía Rainbow Paint Manufacturing tiene una variada línea de productos. Uno de ellos es la pintura de látex. Rainbow puede fabricar pintura a una tasa anual de 8000 galones. El costo unitario de producir un galón de pintura es $0.25 y el costo anual de mantener el inventario es 40%. Antes de cada corrida de producción se realiza la limpieza y verificación de las operaciones a un costo de $25. Analice este problema.

Solución. La información básica para la producción de la pintura de látex es

A = $25 por preparación *i*
=40% anual *c* = $0.25
por galón
h = 0.40 x $0.25 = $0.10 por galón por año *D*
= 4000 galones por año *i* = 8000 galones por
año

El costo total de inventario promedio anual está dado por

$$K(Q) = cD + \frac{AD}{Q} + \frac{hQ}{2}\left(1 - \frac{D}{\psi}\right)$$

y la cantidad económica a producir es

$$\text{EPQ} = Q^* = \sqrt{\frac{2AD}{h\left(1 - \frac{D}{\psi}\right)}} = \sqrt{\frac{(2)(25)(4000)}{(0.1)(1 - 4000/8000)}} = 2000$$

Calculando,

$$T_p = \frac{Q}{\psi} = \frac{2000}{8000} = 0.25 \text{ años} = 3 \text{ meses}$$

$$T = \frac{Q}{D} = \frac{2000}{4000} = 0.5 \text{ años} = 6 \text{ meses}$$

es decir, hay dos ciclos por año. En cada uno la producción se lleva a cabo durante T_p/T del ciclo, o la mitad del tiempo. Se sugiere al lector que dibuje la geometría del inventario para este ejemplo.

Este caso tiene una tasa infinita de reabastecimiento en la que se permiten faltantes. Cuando *i* -> <*x*> se obtiene

$$K(Q, b) = cD + \frac{AD}{Q} + \frac{h(Q - b)^2}{2Q} + \frac{2\pi bD + \hat{\pi} b^2}{2Q}$$

que, para $\hat{\pi} \neq 0$, lleva a

$$Q^* = \sqrt{\frac{2AD}{h} - \frac{(\pi D)^2}{h(h + \hat{\pi})}}\sqrt{\frac{h + \hat{\pi}}{\hat{\pi}}}$$

$$b^* = \frac{hQ^* - \pi D}{(h + \hat{\pi})}$$

Ejemplo 6-5. EOQ con faltantes. Jane, entre otros productos, vende solventes. La demanda es muy estable de 500 galones al año. El costo de colocar una orden es $50 y por cada galón Jane paga $2. El costo de mantenerlo en inventario es 20% anual. Si la demanda excede el inventario, Jane estima que habrá dos tipos de costos asociados con la orden atrasada. La pérdida de la buena voluntad es de $0.2 por unidad faltante y un costo de "contabilidad" de $0.2 por unidad faltante por año. Analice este problema.

Solución. Los distintos parámetros son

A = $50

D = 500 galones /año i

= 20%

c = $2 /unidad —» $h = ic$ = $0.4 unidades-año 7t

= 0.2 por galón ít = 0 . 2 por galón por año

Como Jane permite faltantes, el costo anual promedio del inventario es

$$K(Q, b) = \frac{AD}{Q} + cD + h\frac{(Q-b)^2}{2Q} + \frac{(2\pi Db + \hat{\pi}b^2)}{2Q}$$

y la cantidad económica a ordenar y el nivel máximo óptimo de faltantes serán

$$Q^* = \sqrt{\frac{2AD}{h} - \frac{(\pi D)^2}{h(h+\hat{\pi})}}\sqrt{\frac{h+\hat{\pi}}{\hat{\pi}}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \times 50 \times 500}{0.4} - \frac{[0.2 \times 500]^2}{0.4(0.4+0.2)}}\sqrt{\frac{0.4+0.2}{0.2}} = 500 \text{ galones}$$

$$b^* = \frac{hQ^* - \pi D}{(h+\hat{\pi})} = \frac{(0.4)(500) - (0.2)(500)}{0.4+0.2} = 166.7 \approx 167$$

El costo mínimo total anual promedio es

$$K(500, 167) = \frac{(50)(500)}{500} + (2)(500) + \frac{(0.4)(500-167)^2}{(2)(500)}$$

$$+ \frac{(2)(0.2)(500)(167) - (0.2)(167)^2}{(2)(500)}$$

$$= \$1133.33$$

Como Q^* = 500 es igual aD, el ciclo de reorden es un año. El porcentaje de tiempo que el inventario está agotado se puede encontrar con la razón

$$\frac{T_4}{T} = \frac{b}{TD} = \frac{167}{500} = 33.3\%$$

Se sugiere al lector que dibuje la geometría del inventario para este ejemplo.

2.1.3 Descuentos por cantidad

El modelo EOQ supone que el costo unitario es constante, independientemente de qué cantidad se compre. En realidad, los proveedores pueden inducir a sus clientes a colocar órdenes más grandes ofreciéndoles descuentos por cantidad. Si la cantidad comprada es mayor que una cantidad específica de "precio con descuento", el costo por unidad se reduce. Es práctica común incluir esta política de descuento en las cotizaciones publicadas.

La tendencia del comprador es aprovechar esta situación, en especial si el artículo comprado se usa todo el tiempo. Sin embargo, la compra de grandes cantidades significa un inventario mayor, con un costo más alto de almacenaje. Entonces, los ahorros obtenidos por la compra a un costo unitario más bajo pueden perderse con la acumulación de un costo de inventario mayor. De nuevo se observa la necesidad de balancear costos opuestos. ¿Debe comprarse más para aprovechar los descuentos o debe comprarse menos para mantener un inventario bajo, obteniendo un menor costo de mantener el inventario? Este balance se obtiene modificando el modelo EOQ básico.

Es común encontrar dos tipos de planes de descuento. El **descuento en todas las unidades** aplica el descuento en el precio a todos los artículos, desde el primero, si la cantidad excede el corte del descuento. El otro tipo aplica el descuento sólo al precio de las unidades que exceden la cantidad del corte, que es el plan de **descuento incremental.** Se introduce la notación para los descuentos por cantidad. A menos que se establezca otra cosa, la notación es la misma que para EOQ. Sea

m = número de cortes de precios

q¿ = límite superior del y-ésimo intervalo de corte de precio *Cj* = costo de una unidad en el y-ésimo intervalo [^ _,, *qj]* de corte de precio *Qj* = cantidad EOQ, calculada usando *c¡ Qj* = la mejor cantidad a ordenar en el intervalo *j Q** = cantidad óptima a ordenar para todos los precios *Kj (Q)* = costo de *Q* unidades en el intervalo *j Kj (Qj*) = costo de EOQ unidades en el intervalo *j K* ■ *(QJ*) = costo mínimo en el intervalo *j K* (Q*)* = costo mínimo para todos los precios *Cj (Q)* = costo de compra de *Q*unidades en el intervalo *j*

Por definición, q_0 = Oy q_{m+}, = oo, y lógicamente, $c_j > c_{j+v}$ Para el plan de descuento en todas las unidades, el precio de compra de Q unidades es

$$C_j(Q) = c_j Q \qquad \text{para } q_{j-1} \leq Q < q_j$$

pero el plan de descuento incremental tiene

$$C_j(Q) = \sum_{k=1}^{j-1} c_k q_k + c_j(Q - q_{j-1}) \qquad \text{para } q_{j-1} \leq Q < q_j$$

En el ejemplo 6-6 se ilustran estas políticas.

Ejemplo 6-6. Descuentos por cantidad. Coldpoint es un fabricante de electrodomésticos. La compañía compra cierta componente para sus productos. Southern Electronics y Electro Tech son dos compañías que producen esta componente, y sus productos y servicios son iguales, de manera que comprarán la componente con base sólo en el costo. Ambas compañías ofrecen descuentos por cantidad según el tamaño de la orden. No obstante, estas dos empresas tienen diferentes planes de precios. En Southern Electronics, si la cantidad ordenada es menor que 500 (^,) unidades, el precio es $0.60 por unidad; si la cantidad es 500 o más, pero menos de 1000 *(q_2)*, el precio unitario es $0.58; cualquier cantidad mayor o igual a 1000 unidades tiene un precio unitario de $0.56. ElcctroTech ofrece el mismo rango de precios y cantidades; sin embargo, la tasa de descuento se aplica sólo a la cantidad ordenada en exceso. Es decir, si la cantidad ordenada es 500 unidades, las primeras 499 cuestan $0.60 y la que sigue cuesta $0.58. Si se ordenan 1000 unidades, las primeras 499 cuestan $0.60 y las siguientes 500 [500,999] cuestan $0.58. Cualquier cantidad mayor o igual a 1000 cuesta $0.56. La tabla 6-1 describe los dos planes de precios.

Cantidad *(Q)*	Southern Electronics	ElectroTech
0 < *Q* < 500	0.600	0.60
500 < 0 < 1000	0.580	0.6 x 500 + 0.58(0 - 500)
1000 < *Q* < oo	0.560	0.6 x 500 + 0.58 x 500 + 0.56(0 - 1000)

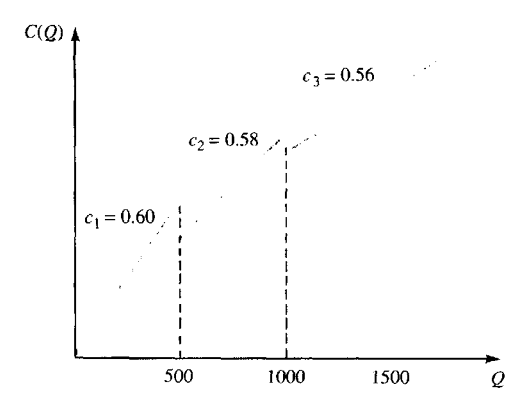
La descripción gráfica de los dos planes se muestra en las figuras 6-8 y 6-9. El coste promedio por unidad, *(Cj(Q)/Q)*, es igual a c_j en el plan de descuento en todas las unidades y es mayor que c, en el plan de descuentos increméntales (vea la tabla 6-2).

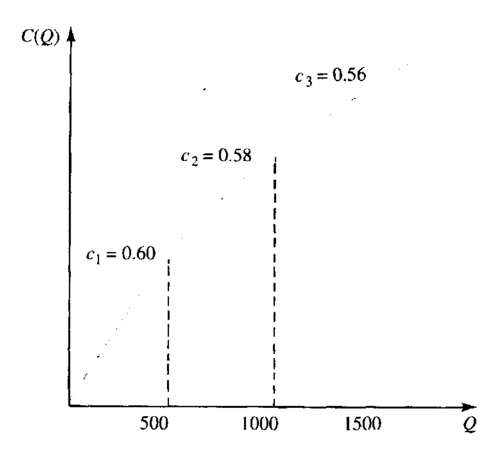
Como antes, el objetivo es encontrar la cantidad Q que minimice el costo total anual promedio. Sea

$$Q_j = \sqrt{\frac{2AD}{ic_j}}$$

$$K_j(Q_j) = c_jD + \sqrt{2ADic_j}$$

Descuento en todas las unidades





Descuento incremental

Éstas son las cantidades óptimas a ordenar y el costo mínimo, dado un precio c_j. Como c_j cambia, c_j debe formar parte de la ecuación de costo. Si $q_{j-1} \leq Q_j < q_j$, el precio c_j es válido, por lo que Q_j es la mejor cantidad a ordenar para el intervalo $[q_{j-1}, q_j]$. Sea $Q_j^* = Q_j$ y $K_j^*(Q_j^*)$ su costo.

Southern

Sin embargo, Q_j puede (Electronic el intervalo de corte de precios. En este caso, es necesario encontrar la mejor cantidad a ordenar para el intervalo. Cosidere la figura 6-10 con dos intervalos de cortes de precios. Se muestran tres casos diferentes para la posición de Q_j respecto a q_1. En el caso a), Q_1^* está fuera de la región válida $[0, q_1]$, y no se puede comprar la cantidad de c_1 por unidad. El costo menor para una cantidad dentro de $[0, q_1]$ corresponde a q_1. Se hace $Q_1^* = q_1$ con un costo $K_1(q_1)$. El caso a) tiene a Q_2 en el intervalo $[q_1, \infty]$, de manera que $Q_2^* = Q_2$ y su costo es $K_2(Q_2^*)$. Esta función $K_2(Q_2^*)$ es menor que $K_1(q_1)$ porque $c_2 < c_1$, entonces $Q^* = Q_2^*$ y $K^*(Q^*) = K_2(Q_2^*)$.

En b), los dos valores Q_1^* y Q_2^* caen dentro de sus regiones válidas, pero como $c_2 < c_1$, $K_2(Q) < K_1(Q)$ para toda Q, entonces la cantidad óptima a ordenar sería $Q^* = Q_2^*$ con un costo mínimo $K^*(Q^*) = K_2(Q_2^*)$. El caso c) tiene Q_1^* en $[0, q_1]$ mientras que $Q_2^* < q_1$. Debido a que $K_2(q_1) < K_1(Q_1^*)$, entonces $Q^* = q_1$ con un costo óptimo $K^*(Q^*) = K_2(q_1)$.

De esta presentación se obtienen las conclusiones:

- Como $c_j > c_{j+1}$, $K_j(Q) > K_{j+1}(Q)$ para toda Q.
- Las únicas cantidades en el intervalo $[q_{j-1}, q_j]$ que pueden ser óptimas para todo el problema son Q_j y q_j. Como $K(Q)$ es una función convexa, las únicas posibilidades son Q_j, q_{j-1} o q_j. Como $K_{j-1}(Q) > K_j(Q)$, q_j tendrá el costo menor en el intervalo $[q_j, q_{j+1})$ y no tiene que tomarse en cuenta en el intervalo $[q_{j-1}, q_j)$.

TABLA 6-2 Costo unitario promedio.

Cantidad (Q)	Southern Electronics	ElectroTech
$0 \leq Q < 500$	0.60	0.60
$500 \leq Q < 1000$	0.58	$10/Q + 0.58$
$1000 \leq Q \leq \infty$	0.56	$30/Q + 0.56$

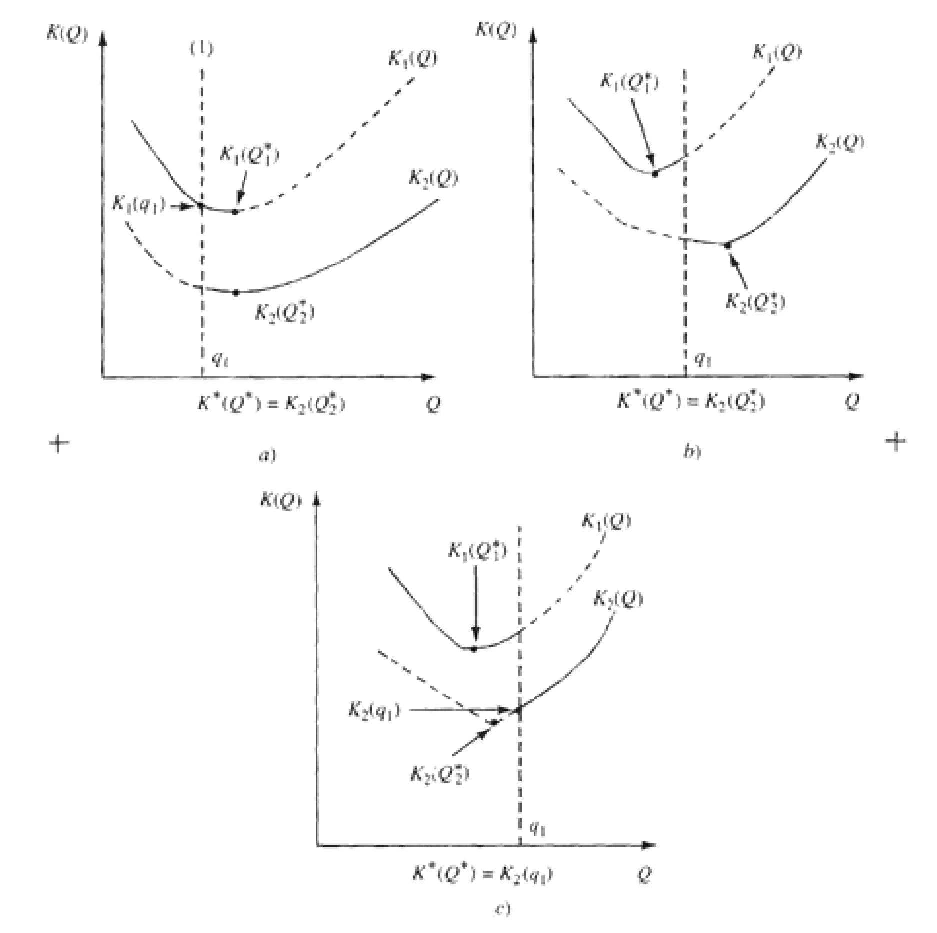


FIGURA 6-10
Curvas de costo para descuento en todas las unidades

Ésta es la base de la formulación del procedimiento para encontrar la solución óptima para la política de descuento en todas las unidades:

Paso 0: Se hace $Q^* = 0$, $K^*(Q^*) = \infty$ y $j = m$.

Paso 1: Se calcula Q_j; si $q_{j-1} \leq Q_j \leq q_j$, se va al paso 3. De otra manera, se hace $Q_j^* = q_j$ y $K_j(Q_j^*) = K_j(q_j)$.

Paso 2: Si $K_j(Q_j^*) < K^*(Q^*)$, se hace $Q^* = Q_j$ y $K^*(Q^*) = K_j(Q_j^*)$. Se establece $j = j-1$ y se va al paso 1.

Paso 3: Se hace $K^*(Q_j^*) = c_j D + \sqrt{2ADic_j}$. Si $K_j(Q_j^*) < K^*(Q^*)$, entonces $Q^* = Q_j^*$ y $K_j^*(Q^*) = K_j(Q_j^*)$. El proceso se detiene; la cantidad óptima a ordenar es Q^* con costo total $K^*(Q^*)$.

El siguiente ejemplo ilustra este procedimiento.

Ejemplo 6-7- Descuento en todas las unidades. Continuamos con el ejemplo de Coldpoint. La compañía estima que el costo de colocar una orden es $20 y que la demanda anual uniforrr e para esta

subcomponente es 800 unidades. El costo de mantener el inventario es 20% anual. Se desea encontrar la mejor política de compra si la subcomponente se ordena a Southern Electronics.

Solución. Se observa que los parámetros básicos de este problema son:

$$\begin{aligned} A &= \$20 \\ D &= 800 \text{ unidades por año} \\ i &= 20\% \text{ anual} \\ m &= 3 \end{aligned}$$

Paso 0: Se hace $Q^* = 0$, $K^*(Q^*) = \infty$ y $j = m = 3$.

Paso 1: Se calcula Q_3 con $c_3 = 0.56$:

$$Q_3 = \sqrt{\frac{(2)(20)(800)}{(0.2)(0.56)}} = 535$$

Como $Q_3 < 1000$, se establece $Q_3^* = 1000 = q_3$ y se calcula

$$\begin{aligned} K_3(q_3) &= c_3 D + \frac{AD}{q_3} + ic_3\frac{q_3}{2} \\ &= (0.56)(800) + \frac{(20)(800)}{1000} + (0.20)(0.56)\left(\frac{1000}{2}\right) \end{aligned}$$

= 520

Paso 2: ^(1000) < *K** (£>*),por lo que *Q* * = lOOOy *K** (1000) = 520. *j* = 3 - 1 = 2y se va al paso 1.

Paso 1: Se calcula Q_2 con Cj = 0.58:

$$Q_2 = \sqrt{\frac{(2)(20)(800)}{(0.2)(0.58)}} = 525$$

Como 500 < 525 < 1000, ésta es una cantidad factible a ordenar al precio dado; se va al paso 3.

Paso 3: Se calcula

$$\begin{aligned} K_2(Q_2^*) &= c_2 D + \sqrt{2ADic_2} \\ &= (0.58)800 + \sqrt{(2)(20)(800)(0.20)(0.56)} \\ &\approx 525 \end{aligned}$$

Como 525 > 520, la cantidad económica a ordenar es 1000 unidades y el costo anual promedio del inventario es $520 a un precio unitario de $0.56. En la figura 6-11 se comparan las tres curvas de costo.

Descuento incremental. Ahora se examinará la opción de descuento incremental de Electro-Tech presentada en el ejemplo 6-6. Como se muestra en la tabla 6-2, se puede evaluar el costo unitario promedio para cada región de corte de precios. El costo unitario que se usa para evaluar el costo total anual promedio es el costo unitario en el intervalo *j*, es decir, *C} (Q)/Q.*

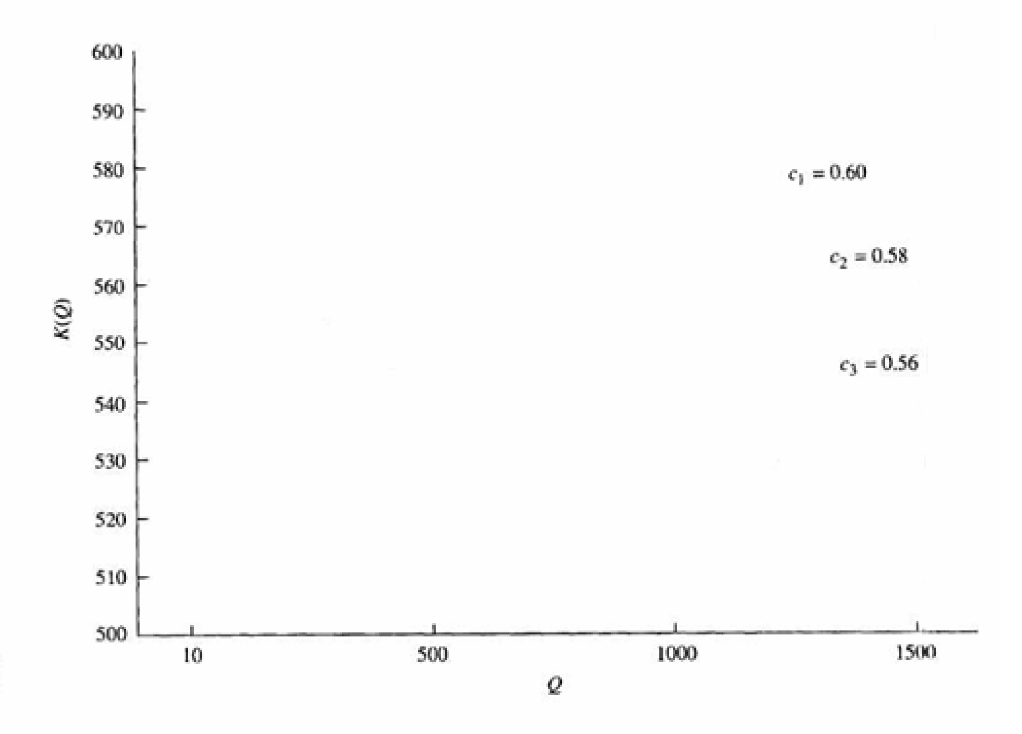


FIGURA 6-11

Curvas de costo para Southern Electronics

La función del costo promedio anual para $q_{j-1} < Q < q_j$ es

$$K_j(Q) = \frac{C_j(Q)}{Q} D + \frac{AD}{Q} + i\left(\frac{C_j(Q)}{Q}\right)\left(\frac{Q}{2}\right)$$

$K_j(Q)$ es válida sólo entre los puntos de corte de precios $[q_{j-1}, q_j]$. Se puede demostrar que el punto del costo mínimo nunca ocurrirá en el punto de corte de precios (Hadley y Whitin, 1963). Más aún, si la Q óptima para un intervalo está en el intervalo, no hay garantía de que sea la mejor para todos los valores; se debe calcular la mejor Q para cada corte de precios, calcular el costo para cualquier Q que cae dentro de su propia región y elegir el costo menor. Derivando $K_j(Q)$ e igualando el resultado a cero, la Q óptima para el intervalo j es

$$Q_j = \sqrt{\frac{2D[A + C(q_{j-1}) - c_j q_{j-1}]}{ic_j}}$$

donde $C(q_{j-1})$ es el costo total en el punto de corte $j - 1$.

El algoritmo para el problema de descuento incremental es

Paso 0: Se hace $Q^* = 0$, $K^*(Q^*) = \infty$ y $j = 1$.

Paso 1: Se calcula Q_j; si $q_{j-1} < Q_j < q_j$, se calcula $K_j(Q_j)$. Si Q_j no está en el intervalo, se establece $K_j(Q_j) = \infty$.

Paso 2: Se hace $j = j + 1$. Si $j \leq m$, se va al paso 1.

Paso 3: Sea $K_l(Q_l) = \min_{j=1,m} K_j(Q_j)$; entonces $Q^* = Q_l$ y $K^*(Q^*) = K_l(Q_l)$.

Este procedimiento se ilustra con el ejemplo 6-8.

Ejemplo 6.8. Descuento incremental. Si Coldpoint considera comprar a ElectroTech la componente, ¿cuál es la mejor política de compra?

Solución. Recuerde que A = \$20, D = 800 unidades/afio e i = 0.20 anual. En la tabla 6-3 se presentan otros datos relevantes y algunos cálculos. Se sigue el procedimiento del descuento incremental para encontrar Q^*.

Paso 0: Se hace $Q^* = 0$, $K^*(Q^*) = \infty$ y $j = 1$.

Paso 1: Calcular

$$Q_1 = \sqrt{\frac{2D[A + C(q_0) - c_1 q_0]}{i c_1}} = \sqrt{\frac{2 \times 800[20 + 0 - 0]}{0.2 \times 0.6}} \approx 516$$

Como $Q_1 = 516 > 500$, no está en el intervalo, de manera que $K_1(Q_1) = \infty$.

Paso 2: Se hace $j = 1 + 1 = 2 < 3 = m$, por lo que se va al paso 1.

Paso 1: Se encuentra $Q_2 \approx 643$ (verifique), que está en el intervalo (500, 1000]. Por lo tanto, se calcula

$$K_2(Q_2) = \frac{C_2(Q_2)}{Q_2}D + \frac{AD}{Q_2} + i\left(\frac{C_2(Q_2)}{Q_2}\right)\left(\frac{Q_2}{2}\right)$$

$$K_2(643) = \left(0.58 + \frac{10}{643}\right)800 + \frac{20 \times 800}{643} + 0.2\left(0.58 + \frac{10}{643}\right)\left(\frac{643}{2}\right)$$

$$= \$539.63$$

Paso 2: Se hace $j = 2 + 1 = 3 \leq m$, entonces se va al paso 1.

Paso 1: Se encuentra $Q_3 \approx 845$, que no está en el intervalo $(1000, \infty]$, de manera que se establece $K_3(Q_3) = \infty$.

Por lo tanto, si Coldpoint coloca un orden con ElectroTech, cada orden debe ser por 643 unidades y el costo anual promedio es \$539.62. Este costo es más alto comparado con las 1000 unidades y el costo anual promedio de \$520 por la compra a Southern Electronics. Es evidente que debe preferirse Southern Electronics, no sólo por la ventaja en el costo, sino también por la conveniencia de hacer menos pedidos al afio como consecuencia de la cantidad a ordenar mayor. En la figura 6-12 se muestran las tres curvas de costo para el plan de descuento incremental. Compárelas con las de la figura 6-11 para el plan de descuento en todas las unidades.

TABLA 6-3
Cálculos para ElectroTech

j	q_j	c_j	$C_j(Q)$	$C(q_j)$
1	500	0.60	$0.6Q$	300
2	1000	0.58	$300 + 0.58(Q - 500)$	590
3	> 1000	0.56	$590 + 0.56(Q - 1000)$	—

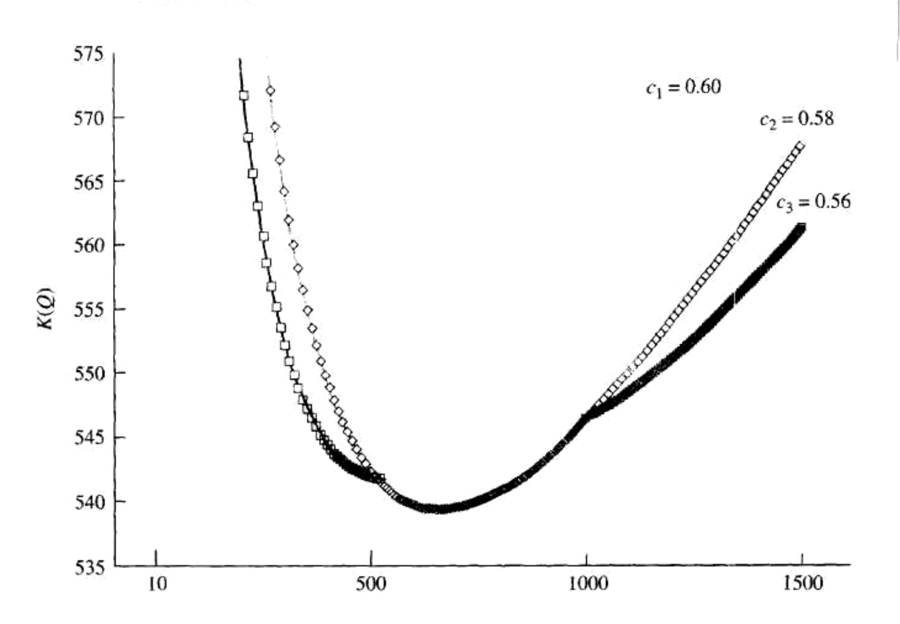


FIGURA 6-12
Curvas de costo para ElectroTech

2.1.4 Modelos de artículos múltiples con restricción de recursos

El modelo clásico del lote económico (EOQ) es para un solo artículo. ¿Qué pasa cuaindo se tiene más de uno?

La respuesta inmediata y trivial es calcular el EOQ para cada artículo. Para dec irlo de otra manera, el sistema con múltiples artículos se maneja como múltiples sistemas de un artículo. Este procedimiento es adecuado cuando no hay interacción entre los artículos, como compartir recursos comunes. Los recursos comunes pueden incluir, por ejemplo, presupuesto] capacidad de almacenaje o ambos. Entonces el procedimiento del EOQ ya no es adecuado, ya que estos recursos comunes son limitados y el resultado puede violar la restricción de recurslos. Por esa razón se necesita una modificación del modelo EOQ clásico.

Se formula el problema como un modelo de optimización restringido y se resuelve usando multiplicadores de Lagrange. En muchas aplicaciones existen sólo una o dos restricciones. Pa ra introducir este enfoque se considerará el caso de una restricción, digamos presupuesto. Se requiere que en cualquier punto en el tiempo, la inversión total en inventario no exceda C dóla res, es decir,

$$\sum_{i=1}^{n} c_i Q_i \leq C$$

donde n es el número de artículos. No se tomará en cuenta la posibilidad de que las órdenes estén desfasadas y que los niveles máximos de inventario de todos los artículos no ocurran al mismo tiempo.

El objetivo todavía es minimizar el costo total anual promedio,

$$K(Q) = \sum_{i=1}^{n} K_i(Q_i) = \sum_{i=1}^{n}\left(c_i D_i + \frac{A_i D_i}{Q_i} + h_i \frac{Q_i}{2}\right)$$

donde X es el multiplicador de Lagrange. El multiplicador actúa como una penalización para re-

La ecuación de Lagrange considera tanto el objetivo como la restricción y es

$$K(Q, \lambda) = K(Q) + \lambda \left\{ \sum_{i=1}^{n} c_i Q_i - C \right\}$$

ducir cada Qf para minimizar el costo al mismo tiempo que satisfacer la restricción. El valor mínimo de K se encuentra tomando derivadas parciales de la función $K\{Q, X)$. Los pasos requeridos para encontrar la solución óptima son:

1. Se resuelve el problema no restringido. Si se satisface la restricción, ésta es la solución óp tima.
2. Si no ocurre así, se establece la ecuación para $K(Q, X)$.
3. Se obtiene Qf resolviendo las $(n + 1)$ ecuaciones dadas por

$$\frac{\partial K(Q, \lambda)}{\partial Q_i} = 0 \qquad \text{para } i = 1, 2, \ldots, n$$

$$\frac{\partial K(Q, \lambda)}{\partial \lambda} = 0$$

Se ilustra este procedimiento con el siguiente ejemplo.

Ejemplo 6-9. Artículos múltiples, una restricción. HiEnd, una pequeña compañía de computadoras, compra dos tipos de lectoras de discos. Debido al bajo volumen que maneja la compañía, el gerente limita la inversión en inventario a un máximo de $5000. El precio de estas dos lectoras es de $50 y $80, respectivamente, y su demanda anual es 250 y 484 unidades, respectivamente. La compañía tiene un gasto de $50 para procesar la orden de cualquiera de estas lectoras, y el gerente usa un 20% anual para las evaluaciones financieras.

Solución. Se analiza el problema estableciendo los parámetros básicos:

$$A = \$50$$
$$i = 20\% \text{ anual}$$
$$C = \$5000$$
$$c_1 = \$50 \rightarrow h_1 = \$10 \text{ por unidad por año}$$
$$D_1 = 250 \text{ unidades por año}$$
$$c_2 = \$80 \rightarrow h_2 = \$16 \text{ por unidad por año}$$
$$D_2 = 484 \text{ unidades por año}$$

Paso 1: Se calcula el EOQ para cada lectora; es decir, se resuelve el problema no restringido.

$$Q_1 = \sqrt{\frac{(2)(50)(250)}{(0.2)(50)}} = 50 \text{ unidades}$$

$$Q_2 = \sqrt{\frac{(2)(50)(484)}{(0.2)(80)}} = 55 \text{ unidades}$$

Usando estos dos valores se calcula la inversión en inventario:

$$(50)(50) + (80)(55) = 6900 > 5000$$

es decir, se viola la restricción de presupuesto, por lo tanto, se aplica el método de multiplicadores de Lagrange.

Paso 2: La ecuación de multiplicadores de Lagrange es

$$K(Q_1, Q_2, \lambda) = \sum_{i=1}^{2}\left(c_iD_i + \frac{A_iD_i}{Q_i} + \frac{h_iQ_i}{2}\right) + \left(\sum_{i=1}^{2} c_iQ_i - C\right)$$

Se calculan Q_1 y Q_2 usando derivadas parciales:

$$\frac{\partial K(Q_1, Q_2, \lambda)}{\partial Q_1} = 0$$

implica que

$$Q_1^* = \sqrt{\frac{2A_1D_1}{h_1 + 2\lambda c_1}}$$

$$= \sqrt{\frac{25\,000}{10 + 100\lambda^*}}$$

$$= \frac{50}{\sqrt{1 + 10\lambda^*}}$$

y

$$\frac{\partial K(Q_1, Q_2, \lambda)}{\partial Q_2} = 0$$

implica que

$$Q_2^* = \sqrt{\frac{48\,400}{16 + 160\lambda^*}}$$

$$= \frac{55}{\sqrt{1 + 10\lambda^*}}$$

Por último,

$$\frac{\partial K(Q_1, Q_2, \lambda)}{\partial \lambda} = 0$$

implica que

$$c_1Q_1^* + c_2Q_2^* = 5000$$

Se hace $X = \sqrt{1 + 10\lambda^*}$

Entonces

$$c_1Q_1^* + c_2Q_2^* = (50)\{(50)/X\} + (80)\{(55)/X\} = 5000$$

Despejando $X = 6900/5000 = 1.38$ da $\lambda^* = 0.09044$. Así,

$$Q_1^* = 50/1.38 = 36.23 \approx 36$$

$$Q_2^* = 55/1.38 = 39.86 \approx 40$$

Entonces la función de Lagrange es

$$K(36, 40, 0.09044) = \left[(50)(250) + \frac{(50)(250)}{36} + \frac{(10)(36)}{2}\right]$$
$$+ \left[(80)(484) + \frac{(50)(484)}{40} + \frac{(16)(40)}{2}\right]$$
$$+ (0.09044)[(50)(36) + (80)(40) - 5000] = 52\,672.22$$

(Observe que el último término es cero, ¿por qué?) Entonces, la inversión total en inventario es

$$(36)(50) + (40)(80) = 5000$$

Artículos múltiples con restricción de recursos: extensión. Se mencionó que las dos restricciones más comunes en los sistemas de inventarios son espacio y presupuesto. Se extiende el análisis anterior a un caso de dos restricciones. La formulación del problema general es

$$\text{minimizar} \qquad K(Q) = \sum_{i=1}^{n} K_i(Q_i) = \sum_{i=1}^{n}\left(c_iD_i + \frac{A_iD_i}{Q_i} + h_i\frac{Q_i}{2}\right)$$

$$\text{sujeta a} \qquad \sum_{i=1}^{n} c_iQ_i \le C \qquad \text{(restricción de presupuesto)}$$

$$\sum_{i=1}^{n} f_iQ_i \le F \qquad \text{(restricción de espacio)}$$

$$Q_i \ge 0 \qquad i = 1, 2, \dots, n$$

/, es el espacio requerido para una unidad del artículo tipo *i y Fes* el espacio total disponible.

Este problema es más complicado, una o ambas restricciones pueden ser inactivas. Por lo tanto, el procedimiento de una sola restricción cambia como sigue:

1. Se resuelve el problema no restringido. Si ambas restricciones se satisfacen, esta solución es la óptima.
2. De otra manera se incluye una de las restricciones, digamos la de presupuesto, y se resuel ve el problema de una restricción para encontrar Q_x. Si la restricción de espacio se satisfa ce, esta solución es la óptima.
3. De otra manera se repite el proceso sólo con la restricción de espacio.
4. Si las dos soluciones con una restricción no llevan a la solución óptima, entonces ambas restricciones son activas, y debe resolverse la ecuación de Lagrange con ambas restric ciones:

$$K(Q_1, \lambda_1, \lambda_2) = \sum_{i=1}^{n}\left(c_iD_i + \frac{A_iD_i}{Q_i} + h\frac{Q_i}{2}\right) + \lambda_1\left(\sum_{i=1}^{n} c_iQ_i - C\right) + \lambda_2\left(\sum_{i=1}^{n} f_iQ_i - F\right)$$

Para encontrar $\{Q_i\}$ óptimo, se resuelven las siguientes $(n + 2)$ ecuaciones simultáneas:

$$\frac{\partial K}{\partial Q_i} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\frac{\partial K}{\partial \lambda_1} = 0 \quad \frac{\partial K}{\partial \lambda_2} = 0$$

Este procedimiento se ilustra en el siguiente ejemplo.

Ejemplo 6-10. Artículos múltiples: dos restricciones. HiEnd no tiene mucho espacio para almacenar las lectoras de discos. Suponga que cada tipo de lectora requiere 10 y 8 unidades de espacio, respectivamente, y cuenta con un total de 500 unidades. ¿Satisfacen los resultados previos la restricción de espacio? Resuelva este problema como se necesite.

Solución. Recuerde el procedimiento en el ejemplo 6-9.

Paso 1: Como del ejemplo 6-9 se sabe que la solución no restringida viola la restricción de presupuesto, el paso 2 se puede omitir.

Paso 2: Se selecciona una de las restricciones y se resuelve como un problema de una restricción. En el ejemplo 6-9 se resolvió el problema con la restricción de presupuesto. Por lo t anto, se selecciona el presupuesto como la única restricción, y se tiene la solución *Q[*- 36 y Q'_2 = 40.

Paso 3: Se verifica la solución de la restricción de presupuesto para ver si se satisface la restricción de espacio:

$$(10)(36) + (8)(40) = 680 > 500$$

Se viola la restricción de espacio.

Paso 4: Se resuelve el problema de multiplicadores de Lagrange con la restricción de espacio nada más.

$$K(Q_1, Q_2, \lambda_2) = \sum_{i=1}^{2} \left(c_i D_i + \frac{A_i D_i}{Q_i} + \frac{h_i Q_i}{2} \right) + \lambda_2 \left(\sum_{i=1}^{2} f_i Q_i - F \right)$$

Se obtienen las derivadas parciales respecto a Q_1, Q_2 y λ_2, y se igualan a cero. Se obtiene

$$\frac{\partial K(Q_1, Q_2, \lambda_2)}{\partial Q_1} = 0 \Rightarrow Q_1^* = \sqrt{\frac{2A_1D_1}{h_1 + 2\lambda_2^* f_1}} = \frac{50}{\sqrt{1 + 2\lambda_2^*}}$$

$$\frac{\partial K(Q_1, Q_2, \lambda_2)}{\partial Q_2} = 0 \Rightarrow Q_2^* = \sqrt{\frac{2A_2D_2}{h_2 + 2\lambda_2^* f_2}} = \frac{55}{\sqrt{1 + \lambda_2^*}}$$

$$\frac{\partial K(Q_1, Q_2, \lambda_2)}{\partial \lambda_2} = 0 \Rightarrow f_1Q_1^* + f_2Q_2^* = 500$$

De las tres ecuaciones, se tiene

$$10\left(\frac{50}{\sqrt{1 + 2\lambda_2^*}}\right) + 8\left(\frac{55}{\sqrt{1 + \lambda_2^*}}\right) = 500$$

y al resolver se obtiene $\lambda_2^* \approx 1.76$ y

$$Q_1^* = 23.51 \approx 23$$

$$Q_2^* = 33.11 \approx 33$$

Se verifica esta solución con la restricción de presupuesto

$$(23)(50) + (33)(80) = 3790 < 5000$$

No viola la restricción de presupuesto. Las cantidades óptimas a ordenar bajo las restricciones de presupuesto y espacio son $Q^* = 26$, $Q\% = 33$.

Compare estos resultados con los del ejemplo 6-9.

2.1.5 Órdenes para múltiples artículos[1]

Una tendencia común en la industria actual es reducir el número de proveedores y hacer que cada uno entregue un número más grande de artículos, tanto en términos de cantidad como de variedad (capítulo 2). La lógica es que, por lo general, existe un contrato a largo plazo para todos los artículos que incurren en cierto costo inicial, y después las entregas se hacen de acuerdo con las órdenes emitidas para cada artículo (incurriendo en un costo de ordenar individual). Se analizará aquí este tipo de ambiente, es decir, un sistema de artículos múltiples con un solo proveedor. Al hacerlo, se seguirá de cerca el modelo presentado por Goyal (1974).

Suponga que se compran n artículos a un solo vendedor. El costo de ordenar tiene dos componentes, un costo principal común de ordenar A en el que se incurre siempre que se coloca una orden, y un costo de ordenar menor a_i si se incluye el artículo i en la orden. Se supone que la demanda del artículo i es constante con una tasa de D_i unidades por periodo (año). La notación adicional es

N = número de órdenes de compra en el periodo de planeación (un año)
N_i = número de reabastecimiento del artículo i en el periodo de planeación (un año)
h_i = costo total anual de mantener el artículo íésimo en inventario
Q_i = cantidad a ordenar del artículo
$K(N)$ = costo variable total anual promedio para todos los artículos (costos de ordenar y mantener el inventario)

Se supone que se tiene el siguiente ambiente de decisiones:

- El tiempo de entrega es constante.
  No se permiten faltantes (esto es, costo de faltantes infinito).
- Existe una tasa de reabastecimiento infinita.
  Existe un horizonte de tiempo infinito.
- Las órdenes de compra se colocan a intervalos constantes
- Un artículo se reabastece en intervalos iguales.

Siguiendo el razonamiento de la formulación del EOQ, $K(N)$ se puede expresar como

$$K(N) = AN + \sum_{i=1}^{n} a_i N_i + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} \frac{h_i D_i}{N_i}$$

donde

$$Q_i = \frac{D_i}{N_i}$$

Suponga que el artículo i se ordena en todas las compras k_i. Entonces

$$k_i = \frac{N}{N_i}$$

[1] Tomado de Goyal (1974). Usado con permiso.

y éste es el número de veces que se ordenan artículos tipo *i.* El recíproco de k_j (esto es, N_j ¡N) se define como la frecuencia relativa con que se ordena el artículo *i.* Así, si se conoce la frecuencia relativa de un artículo, se puede determinar su valor *k.* Se establece $N_j = N/k_j$, y se llega a

$$K(N) = N\left(A + \sum_{i=1}^{n} \frac{a_i}{k_i}\right) + \frac{1}{2N}\sum_{i=1}^{n} h_i D_i k_i$$

Para *n* artículos, es posible especificar el valor de *k* para cada uno mediante una (fombina-**cióa$\{k_{li}k_{2t}\ldots{}_{t}k_{H}\}$.**

Suponga que se da una combinación específica de {A:,}para $i = 1,2,\ldots,$«. Entonjces, para obtener el óptimo se toman las primeras ecuaciones en diferencias de *K(N)* y se tieiie

$$K^*(k_i) = \sqrt{\left[2\left(A + \sum_{i=1}^{n} \frac{a_i}{k_i}\right)\sum h_i D_i k_i\right]}$$

Costo anual promedio mínimo como función de $\{k_j\}$

$$N^*(k_i) = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} h_i D_i k_i\right)\Big/\left[2\left(A + \sum_{i=1}^{n} \frac{a_i}{k_i}\right)\right]}$$

Número económico de órd;nes de compra como función d:

$$Q_i^*(k_i) = \frac{D_i k_i}{N^*(k_i)}$$

Cantidad económica a ordenar del artículo *i* como función de

Los valores anteriores son óptimos para un conjunto dado de $\{k_v\ k_{2i}\ldots,k_{ly}\ldots\backslash,k_n\}$. Suponga que se puede considerar cambiar de *k,* a k_j con el fin de reducir el costo varis ble anual promedio mínimo dado por K^* (k_j). El costo anual promedio mínimo con el valor A: cambiado para el artículo / está dado por

$$K(k_{l_1}) = \sqrt{\left[2\left(A + \sum_{i=1}^{l-1} \frac{a_i}{k_i} + \sum_{i=l+1}^{n} \frac{a_i}{k_i} + \frac{a_l}{k_{l_1}}\right)\left(\sum_{i=1}^{l-1} h_i D_i k_i + \sum_{i=l+1}^{n} h_i D_i k_i + k_l D_l k_{l_1}\right)\right]}$$

o

$$K(k_{l_1}) = \sqrt{\left[2\left(G_{l_1} + \frac{a_l}{k_{l_1}}\right)(W_{l_1} + h_i D_l k_{l_1})\right]} \qquad (1)$$

donde

$$G_{l_1} = \sum_{i=1}^{l-1} \frac{a_i}{k_i} + \sum_{i=l+1}^{n} \frac{a_i}{k_i}$$

$$W_{l_1} = \sum_{i=1}^{l-1} h_i D_i k_i + \sum_{i=l+1}^{n} h_i D_i k_i$$

El mínimo local de $K(k_{i_1})$ se obtiene si las dos condiciones siguientes se cumplen:

$$K(k_{i_1}) \leq K(k_{i_1}+1) \tag{2}$$

$$K(k_{i_1}) < K(k_{i_1}-1) \tag{3}$$

Se sustituye el valor de $K(k_{i_1})$ obtenido de (1) en (2). Simplificando, se tiene

$$\frac{W_{i_1}}{G_{i_1}H_i} \leq k_{i_1}(k_{i_1}+1)$$

donde, para el artículo i

$$H_i = \frac{h_i D_i}{a_i}$$

Se hace lo mismo con la ecuación (3) para obtener

$$\frac{W_{i_1}}{G_{i_1}H_i} > k_{i_1}(k_{i_1}-1)$$

Combinando las dos últimas ecuaciones se llega a las condiciones óptimas:

$$k_{i_1}(k_{i_1}-1) < \frac{W_{i_1}}{G_{i_1}H_i} \leq k_{i_1}(k_{i_1}+1)$$

Si para el artículo i ocurre que $k_{i_1} \neq k_i$, la nueva combinación está dada por $\{k_1, k_2, \ldots, k_{i_1}, \ldots, k_n\}$ y ésta tiene que mejorarse.

De la desigualdad anterior, se pueden evaluar las cotas superior e inferior para la razón $W_{i_1}/(G_{i_1}H_i)$. Algunos valores se presentan en la tabla 6-4.

Con base en el análisis anterior, Goyal (1974) propone el siguiente algoritmo para determinar la política óptima para ordenar:

1. Se calcula $H_i = h_i D_i / a_i$ para cada artículo.
2. Se suponen valores iniciales arbitrarios para k_i, digamos 1, es decir, $\{1, 1, \ldots, 1\}$ denotados por $\{k_{io}\}$.
3. Para el primer artículo en la lista, se determina k_{i_1} comparando la razón $W_{i_1}/G_{i_1}H_i$ con los valores en la tabla 6-4. La nueva combinación es $\{k_{i_1}, 1, 1, \ldots, 1\}$. De manera similar, se obtienen valores de k_{i1} para $i = 1, 2, \ldots, n$. Esto completa el primer conjunto de cálculos que llevan a $\{k_{i1}\}$ para $i = 1, 2, \ldots, n$.
4. Se aplica el paso 3 a $\{k_{i1}\}$ para obtener $\{k_{i2}\}$ para $i = 1, 2, \ldots, n$. El valor óptimo se obtiene cuando

$$\{k_{i(j+1)}\} = \{k_{ij}\} = \{k_i^*\} \qquad \text{para todo } i$$

Normalmente converge muy rápido.

TABLA 6-4
Cotas superior e inferior para W/GH

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cota inferior	0	2	6	12	20	30	42	56	72	90
Cota superior	2	6	12	20	30	42	56	72	90	110

5. La política óptima es la siguiente:

a) Número óptimo de órdenes de compra por año:

$$N^*(k_i^*) = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} h_i D_i k_i^*\right) \Big/ \left[2\left(A + \sum_{i=1}^{n} \frac{a_i}{k_i^*}\right)\right]}$$

b) Número óptimo de reabastecimientos para el artículo *i*:

$$N_i^* = \frac{N^*(k_i^*)}{k_i^*} \qquad \text{para toda } i$$

c) Cantidad óptima a ordenar para el artículo *i*:

$$Q_i^*(k_i^*) = \frac{D_i k_i^*}{N^*(k_i^*)} \qquad \text{para toda } i$$

Este procedimiento se ilustra con el siguiente ejemplo.

Ejemplo 6-11. Pedidos de artículos múltiples. Coldpoint decidió comprar todas sus conponentes electrónicas a ElectroTech. Negocian un contrato una vez al aflo y el tiempo y papeleo involucrados les cuesta $43.50. El valor anual de D_i, h_i y a_i se presentan en la tabla 6-5.

Solución. *A* = $43.50. Los valores de $H_i = (h_iD_i)la_i$ también se muestran en la tabla 6-5. Las pasos 2,3 y 4 del algoritmo se muestran en la tabla 6-6, que se puede generar usando una hoja de cálculo.

La tasa de cambio para los conjuntos sucesivos de cálculos se puede juzgar según los si guientes resultados.

Costo total anual promedio basdo en $\{k_m\}$ = 11 920

Costo total anual promedio basado en $\{k_n\}$ = 11 454

TABLA 6-5
Datos para el ejemplo 6-11

i (artículo)	D_i (unidades/año)	h_i ($/unidad/año)	a_i ($)	$H_i = h_iD_i/a_i$
1	1500	2	9	333
2	2 500	3	6	1000
3	4 000	1.25	5	1000
4	10 000	1	1	1000
5	2 500	3	7	1 071
6	4 250	2	5	1 700
7	10 000	1.45	8	1 875
8	12 500	1.6	4.5	4 444
9	20 000	2	7	5 714
10	15 000	2	5	6 000
11	50 000	1	8	6 250
12	9 000	5	6	7 500
13	8 000	8	8	8 000
14	35 000	2	8	8 750
15	10 000	10	10	10 000

TABLA 6-6
Calculos para determinar la combinación (k^*)

Primer conjunto de cálculos:

Cuando

$k_{i0} = 1$ para $i = 1, 2, \ldots, 15$

$$W_{i1} = \sum_{i=1}^{l-1} h_i D_i k_{i1} + \sum_{i=l+1}^{15} h_i D_i k_{i0}$$

y

$$G_{i1} = \sum_{i=1}^{l-1} a_i / k_{i1} + \sum_{i=l+1}^{15} a_i / k_{i0}$$

	$W_{i1}/G_{i1}H_i$	k_{i1}	k_{i2}	k_{i3}
1	470 500/(141 × 333) = 10.02	3	4	4
2	473 500/(138 × 1000) = 3.43	2	2	2
3	480 500/(136 × 1000) = 3.533	2	2	2
4	480 500/(128.5 × 1000) = 3.739	2	2	2
5	493 000/(126.5 × 1071) = 3.638	2	2	2
6	499 500/(125 × 1700) = 2.3505	2	2	2
7	502 000/(119.5 × 1812) = 2.318	2	2	2
8	511 000/(119 × 4444) = 0.966	2	2	2
9 a 15	k_{ij} se queda en 1 para estos artículos	1	1	1

Costo total anual promedio basado en $\{k_a\}$ = 11 450

Costo total anual promedio basado en $\{k_0\}$ = 11450

{*„} = {tf} = {4,2,2,2,2,2,2, 1, 1,1,1, 1, 1, 1, 1} Del

paso *5a)* del algoritmo se obtiene

Ai* = 46.6 = 47

El paso 5*b*) conduce al siguiente número óptimo de reabastecimientos por artículo (números redondeados):

(12, 23, 23, 23, 23, 23, 23,47, 47, 47,47, 47, 47, 47, 47)

El paso 5*c*) lleva a la cantidad óptima a ordenar por artículo (números redondeados)

(129, 86, 172,429, 107, 182, 429, 268,429, 321, 1073, 193, 172, 751, 215)

Los valores de *Q** son menores que los obtenidos usando la fórmula del EQO para cada artículo individual.

Una extensión de este análisis para el caso en el que se admiten faltantes se puede encontrar en Kumar y Arora (1990).

SECCIÓN 2.1 EJERCICIOS

6.15. Una tienda con venta directa de fábrica vende 26 "portaespejos" por mes. El costo de ordenar es $ 1.00 por orden, y el costo de mantener el inventario es $0.3 por unidad por mes

a) Suponiendo que no se permiten faltantes, evalúe la cantidad a ordenar (EOQ).
b) Dibuje la geometría del inventario para este caso.

6.16. Harriet es la gerente de compras para la compañía High-Tech. Ahora se enfrenta al siguiente dile ma. Su operación utiliza 10 000 unidades al año de conectores para cable de cobre. Elija sabe que se puede fabricar internamente a una tasa de 100 000 unidades al año a un costo de $40 por unidad. Sin embargo, hay un costo de $5000 asociado a cada corrida de producción y el cosijo anual de mantener inventario es i = 20%.

Harriet tiene conciencia de los costos y ha decidido obtener una cotización de dos proveedores externos. La Electronic Hardware Company ofrece un precio de $44 por unidad, siempre que envíe un mínimo de 1000 unidades; ellos pueden proporcionar hasta 6000 unidades al año. Metsamp Company fijó el precio en $43.50 por unidad, con un costo fijo de $200 por envío, sin importar la cantidad; ellos pueden proporcionar hasta 4000 unidades al año. ¿Cuál es la política óptima que debe usar Harriet, suponiendo que no se permiten faltantes?

6.17. Encuentre la tasa de rotación óptima ((TR)*) para los siguientes casos:

a) El modelo EOQ, sin faltantes
b) El modelo EPQ, con faltantes *{Sugerencia:* Considere el invetario promedio parí el caso de faltantes).

6.18. Considere el caso EPQ con faltantes. Suponga que en lugar de ordenar una cantidad Q *, se ordena una cantidad *$Q* *, donde P > 0. Sea

$$= \frac{K(Q)-K(Q^*)}{K(Q^*)}$$

Desarrolle la ecuación para 8.

Muestre una gráfica de 5 = /(P) y haga observaciones sobre la sensibilidad del sistema de inventario respecto a cantidades a ordenar no óptimas. ¿Puede dibujar una interpretación prác tica?

6.19. Considere un sistema de inventario con tasa de reabastecimiento infinita. Los faltantos no se sur ten atrasados, sino que se pierden. (Éste es el caso de "ventas perdidas".) Suponga qi e la pérdida por unidad es *n.*

Desarrolle el modelo para este caso y muestre los valores óptimos. Pruebe que nunca es ópti mo almacenar el artículo y permitir que se pierdan las ventas. *(Nota:* El costo por faltantes es pro porcional al número de unidades que faltan, y *no* al tiempo transcurrido.)

6.20. La Agrichem Company fabrica un compuesto químico líquido que se usa en la industria de fertili zantes. El producto es perecedero en cuanto a que se deteriora almacenado.

Con base en registros históricos, la empresa desarrolló un modelo de regresión no lineal y encontró que el costo de almacenar Q galones durante un tiempo t es *cQt'"* dólares, con ^constante y m > 1. El compuesto se produce en lotes de Q_o galones. El costo de preparación es A dólares.

a) Encuentre Q *, suponiendo que no se permiten faltantes y tasa de reabastecimiejnto infinita.
b) Evalúe el costo anual $K(Q$ *).
c) Analice el resultado para m = 1 y m —> oo.

6.21. La compañía Bike tiene una línea especial de bicicletas de montaña, para la que se nejcesitan 5000 manubrios al año. Se pueden comprar por $30 por unidad o producir internamente). El costo de producción es $20 por unidad, y la tasa de producción es 20 000 unidades al año. El (costo de pre paración es $ 110, mientras que emitir una orden de compra cuesta $25. El costo de mjantener el in ventario es 25% anual.

a) ¿Debe la compañía Bike hacer o comprar el artículo, suponiendo que no se permiten faltantes?

b) Suponga que se permiten faltantes, con TI = $0.15 por unidad, y n = $7 por unidad por año. ¿Qué debe hacer Bike ahora?

6.22. Cierto artículo tiene una demanda diaria de 1000 unidades. Se compra por lotes con un costo unitario de $5 y un costo de ordenar de $80 por orden. El costo anual de mantener el inventario es 30% y los faltantes se satisfacen atrasados con un costo de $2 por unidad por mes. Las órdenes de compra están programadas de manera que cada 30 días se recibe un lote. Encuentre Q * y b *.

6.23. Toys International tiene varias plantas de fabricación y ensamble. Una de las plantas de fabricación tiene que proveer 640 llantas de juguetes al día a la planta de ensamble. No se permiten faltantes para asegurar la continuidad del proceso de ensamble. La planta tiene una capacidad de 4200 llantas al día. El costo de preparación de la producción es $400 y el costo de almacenaje es $0.30 por unidad por día, mientras que el costo de producción es $92 por llanta.

a) Evalúe el costo mínimo promedio diario.

b) *Eva\úe* T, T_p, T_D, I^.

c) ¿Cuál es el costo mínimo promedio diario si el costo de preparación es $4000? Compare.

6.24. Considere el caso de una tasa de reabastecimiento finita, en la cual no se permiten faltantes (figura 6-7). Durante T_D, la máquina está ociosa. Suponga que el costo del tiempo ocioso es c_d dólares por unidad de tiempo (ya que la máquina se puede usar para fabricar otros productos). Desarrolle una ecuación para Q * que lleve al costo total mínimo promedio y que incluye el costo del tiempo ocioso.

6.25. Utilice los resultados del problema 6.24 y evalúe la razón

S± *c* ¿Puede obtener una conclusión sobre el mundo real?

6.26. Lou es el gerente de compras de un fabricante de zapatos que tiene una línea de botas de escalar fuertes. Él compra las agujetas para las botas a distintos proveedores. La demanda es 30 000 pares de agujetas al año, y no se permiten faltantes. Su principal proveedor tiene el siguiente plan de descuento en todas las unidades:

Cantidad	Precio unitario ($)
Q < 1000	1.00
1000<Q< 3000	0.98
3000 <: Q < 5000	0.96
5000 <, Q < oo	0.94

Lou sabe que emitir una orden le cuesta $100 y que el costo de mantener el inventario es de 35% anual.

a) Calcule Q*.

b) Dibuje una gráfica de $K(Q) = f(Q)$.

6.27. La tienda de curiosidades Pine Garden vende alrededor de 1000 llaveros al año. Se piensa que el costo de almacenaje es $1 por unidad por año. Los faltantes se surten tarde a un costo de $4 anuales por artículo. La tienda de curiosidades paga $2 por unidad en cantidades menores que 2000 unidades y $ 1.97 por unidad en cualquier otra cantidad. Estiman que su costo de ordenar es $50.

Grafique $K(Q) = f(Q)$.

a) Encuentre Q * y b*.

6.28. Skatz Company es uno de los fabricantes importantes de patines de ruedas. En su plarita sólo en samblan y todas las componentes las compran de proveedores externos. No están contentos con el proveedor actual de ruedas y decidieron encontrar una nueva fuente para su mejor modelo. La de manda es 400 000 ruedas al año y han recibido diferentes planes de precios de otros proveedores.

El proveedor A ofrece una tasa pareja de $3 por rueda sin importar la cantidad.

El proveedor B tiene el siguiente plan de descuento en todas las unidades: $3.25 por rueda si la cantidad ordenada es menor que 5000, $3.00 por rueda si la cantidad ordenada es mayor que 5000 y menor que 15 000, y $2.60 por rueda si ordenan más de 15 000.

El proveedor C ofrece un precio de $3.25 si la orden es menor que 10 000 y $2.8 3 por rueda por cada unidad comprada adicional a las 10 000, usando un descuento incremental.

Los tres proveedores tienen la misma calidad de ruedas. El costo de la orden es $ 150 y el costo de mantener el inventario se toma como 30% anual.

a) Evalúe la cantidad óptima a ordenar.
b) Haga una gráfica de sus resultados.

6.29. La política administrativa de cierta compañía es nunca quedarse sin artículos. El departamento de ventas hizo un análisis sobre un artículo en particular para evaluar esta política. La denjianda es determinística y constante a través del tiempo a 625 unidades por año. El costo unitario del artículo es $50, independientemente de la cantidad ordenada. El costo de colocar una orden efs $5.00 y el costo anual de mantener el inventario es i = 0.20. Las órdenes atrasadas tienen un cojto de $0.20 por unidad por semana. Calcule la política óptima de operación bajo la suposición ele que no se permiten faltantes y, también, suponiendo que hay faltantes al costo indicado. ¿Cuál es la pérdida anual en dólares causada por la política de que no haya faltantes, si las estimaciones ¡del departa mento de ventas son correctas para los parámetros pertinentes?

6.30. Una compañía produce dos artículos, A y B, que son perecederos y se deterioran cuando se alma cenan. Los datos concernientes son

	A	B
Demanda/año	2000	250
Costo por artículo	50	60
Tasa de costo anual de almacenaje	0.20	0.10
Costo de preparación	100	480
Costo por faltantes/unidad/aflo	∞	2

La administración ha establecido la política de que la rotación del inventario total debe ser mayor o igual que 19 (recuerde que la rotación de inventario se define como la demanda anual de todos los artículos expresada en dólares, dividida entre la inversión total promedio en; inventario).

Determine la política óptima de inventario y el costo de la política de rotación jde inventario para la administración.

6.31. Una compañía constructora requiere 600 Ib anuales de varilla de soldadura de una ajleación especial. Cada vez que colocan una orden incurren en un costo de $8.00. El precio de coijipra depende de la cantidad ordenada y está dado por

Cantidad	**Precio**
$Q < 500$	$0.30
$500 < Q < 1000$	0.29
$Q > 1000$	0.28

Este es un descuento en todas las unidades. Si la tasa de mantener el inventario por dólar por año es 0.20, ¿cuántas unidades deben ordenarse cada vez que se coloca una orden?

6.32. En el modelo básico EOQ se supone una tasa de demanda constante *D*. Suponga que se encuentra la cantidad óptima a ordenar y que se sigue esta política, pero en realidad la demanda es *D'* (con£)' > *D)*. ¿De qué manera afectará esto al número de órdenes al año, al inventario prome dio anual y al número de faltantes por año?

6.33. Una compañía ordena una componente a un proveedor. La demanda anual es 6000 componentes y ordenan 1000 de ellas cada 365/60 días. Se permiten faltantes.

a) Suponiendo que la compañía actúa de manera óptima, ¿qué puede decir sobre los valores re lativos de los costos de inventario y de ordenar?

b) Si el gerente de control de la producción le ha informado que cuesta $50 colocar una orden y cada componente cuesta $180, ¿qué comentario haría usted sobre el costo de mantener el in ventario?

c) ¿Qué tamaño de lote le recomendaría que ordenara?

6.34. Una compañía ordena dos artículos. El artículo 1 cuesta $10 y tiene una demanda anual de 100 unidades y un costo de ordenar de $40. El artículo 2 cuesta $40 y tiene una demanda anual de 180 y costos de ordenar de $20. La tasa por mantener un inventario es 20% al año. El espacio de alma cén para los dos artículos está limitado y, como son del mismo tamaño, no puede haber más de 40 unidades en total en inventario en ningún momento. Además, el valor total del inventario debe es tar dentro de un presupuesto de $400 en todo momento. ¿Qué cantidad a ordenar recomendaría?

6.35. Una frutería almacena tres productos —manzanas, melones y sandías—. Las demandas (en tem porada), costos unitarios, costos de ordenar y tamaños de los tres artículos son: manzanas, 2500, 0.50,25.00,1; melones, 1000,1.00,20.00,3; sandías, 600,3.50,30.00,10. Suponga que la tasa de costo de inventario es 10% por temporada. Los lotes económicos para los tres artículos son 1581, 632 y 321, respectivamente. Sin embargo, la frutería tiene sólo 6000 unidades de espacio, donde una manzana es igual a una unidad de espacio. Usando un multiplicador de Lagrange, un estu diante determina los tamaños de lote para el problema restringido en 1392, 536 y 300, con *X* - 0.37. Un carpintero local puede construir 500 unidades de espacio adicionales por $160.00. ¿Debe la frutería contratar el espacio adicional?

6.36. Considere el modelo determinístico del EOQ cuando se permiten órdenes atrasadas. Como es nor mal, sea *Q* la demanda, *A* el costo de ordenar y *h* el costo de almacenar por unidad por año. Supon ga que el costo de una orden atrasada por unidad por año es *ñ* = *ah*, donde *a* es una constante.

a) Determine *Q**, el tamaño del lote económico.

b) Determine *b**, la cantidad óptima de faltantes.

c) Grafíque *Q*/b** contra *a*.

6.37. La Bench Company es un pequeño fabricante de bancos de madera. Su línea incluye cuatro tipos de bancos de diferente tamaño, material, terminado y color. Los datos relevantes de producción son:

	Tipo de banco			
	1	2	3	4
Demanda anual (unidades)	1000 6	5000 10	10 000 10 5	8000 8 2
Costo de preparación ($)	10	3 1	1	1.5
Costo unitario ($) Espacio por unidad ($ft^2$)	5			

Bench tiene un pequeño almacén para bancos terminados con un área de 1500 ft^2. Cada tipo de banco tiene un lugar fijo. Suponiendo que *i* = 20% anual, calcule las cantidades óptimas que deben almacenarse.

Bench tiene una oferta del doble de espacio de almacén que dará como resultadcj un incre mento de $200 en los gastos anuales. ¿Debe Bench aceptar esta oferta?

6.38. Suponga que Bench, además de un espacio limitado en el almacén, también tiene un limite en el presupuesto de $3800 para inversión en inventario. Calcule las cantidades óptimas que deben al macenarse. Compare con los resultados del problema 6.37.

6.39. Para el caso de descuento incremental, muestre que el punto de costo mínimo nunca ocujrrirá en un punto de corte de precios. *(Sugerencia:* Evalúe la derivada de *K¿(Q)* y *K*;, +, *{Q)* en *q*}, +, jy demues tre que la derivada de $K_{j+l}(Q)$ es menor que la derivada de *K.(Q).*

2.2 Modelos de tamaño de lote dinámico (TLD)

Los modelos de tamaño de lote dinámico surgen cuando la demanda es irregular, es decir, cuando no es uniforme durante el horizonte de planeación. El análisis de los modelos de "demanda irregular" se organiza en cuatro grupos de técnicas de solución como sigue:

Reglas simples son reglas de decisión para la cantidad económica a ordenar que no están basadas directamente en la "optimización" de la función de costo, sino que tienen otra: i características. Se trata de métodos muy sencillos que son significativos por su amplio uso, en especial en los sistemas de MRP (vea el capítulo 7).

Reglas heurísticas son aquellas que están dirigidas al logro de una solución de bajo costo que no necesariamente es óptima.

Wagner-Whitin es un enfoque de optimización de la demanda irregular.

Regla de Peterson-Silver es una prueba para determinar cuándo la demanda es ijregular.

2.2.1 Reglas simples

Existen tres reglas simples que son comunes: demanda de periodo fijo, cantidad a ordenar en el periodo y lote por lote (con seudónimo de "L x L").

Demanda de periodo fijo Este enfo<]ue es equivalente a la regla simple de ordenar '[m meses de demanda futura". Por ejemplo, si se quiere ordenar para la "demanda de dos meses", se suman las demandas pronosticadas para los próximos dos meses, y ésta es la cantidad ordenada. Se pueden usar semanas o días en lugar de meses. Esta regla es diferente de la medida de efectividad de "abasto para el mes" presentada en la sección 1.4. Ésta es una medida agregada basada en el valor en dólares de **todos** los artículos en inventario. La demanda de periodo fijo se refiere a un solo artículo y se basa en la cantidad.

Ejemplo 6-12. Demanda de periodo fijo. Considere los siguientes dos casos para los que la de manda pronosticada se da en la tabla 6-7.

Solución. Si se usa un periodo fijo de seis semanas, la cantidad a ordenar es 60 para *a)* y f 2 para *b).* El EOQ se prefiere para una demanda constante.

TABLA 6-7

Demanda de periodo fijo

a) Demanda uniforme						
Semana	1 2	3		4 10	5 10	6 10
Demanda		10	10	10		
b) Demanda irregular						
Semana	1 2	3		4 10	5 8	6 10
Demanda		15	11	18		

Cantidad a ordenar para el periodo (COP). Ésta es una modificación de la regla anterior, en la que se usa la "estructura" para seleccionar el periodo fijo. El tamaño de lote promedio que se busca (por el método que sea) se divide entre la demanda promedio; se obtiene el periodo fijo que debe usarse. Si la cantidad a ordenar deseada es 60, entonces el periodo fijo para b) es cinco semanas, ya que la demanda promedio semanal es 12.

Lote por lote (Z, x /,). Éste es un caso especial de la regla de periodo fijo; la cantidad a ordenar es siempre la demanda para un periodo. En el ejemplo 6-12b) las cantidades pedidas serán 10, 15,11, etcétera. Esta regla reduce el nivel de inventario y, por ende, el costo de mantenerlo; pero el resultado es un mayor costo de ordenar por colocar más órdenes. Casi siempre se usa para artículos muy caros (en términos de uso anual del dólar) y para artículos que tienen demanda irregular.

2.2.2 Métodos heurísticos

Un método heurístico es un enfoque que aprovecha la estructura del problema. Mediante el uso de un conjunto de reglas "racionales", obtiene una solución "buena"; es decir, cercana a la óptima o, en ocasiones, la óptima. Los métodos heurísticos se usan cuando no es posible o no es computacionalmente factible obtener el óptimo. Se presentan tres enfoques heurísticos comunes: Silver-Meal, costo unitario mínimo y balanceo de parte del periodo, también conocido como costo total mínimo. El denominador común es que todos comparten el objetivo del EOQ de minimizar la suma de los costos de preparación e inventario, pero cada uno emplea un método distinto. Además, se supone que *A y h* son constantes para todo el horizonte de planeación.

Método Silver-Meal (SM) (Silver and Meal, 1973). El principio de esta heurística es que considera ordenar para varios periodos futuros, digamos *m.* Intenta lograr el costo promedio mínimo por periodo para el lapso de mperiodos. El costo considerado es el costo variable, esto es, el costo de ordenar (preparar) más el costo de mantener el inventario. La demanda futura para los siguientes *n* periodos está dada y es

$$(D_{l\,t} D_{2\,t} . . . , D .)$$

Sea *K(m)* el costo variable promedio por periodo si la orden cubre *m* periodos. Se supone que el costo de mantener inventario ocurre al final del periodo y que la cantidad necesaria para el periodo se usa al principio del mismo. Si se ordena D, para cumplir con la demanda en el periodo 1, se obtiene

$$K(1) = A$$

Si se ordena $D_1 + D_2$ en el periodo 1 para cumplir con la demanda de los periodos 1 y 2, se obtiene

$$K(2)= ½ (A+hD_2)$$

donde *h* es el costo de almacenar una unidad en inventario durante un periodo. Como se almacenan D_2 unidades un periodo más, esa cantidad se multiplica por *h* y para obtener el costo promedio para los dos periodos, se divide entre 2. De manera similar

$$K(3) = ½ (A +hD_2 + 2hD_3)$$

y, en general,

$$K(m) = \frac{1}{m}(A + hD_2 + 2hD_3 + \cdots + (m-1)hD_m)$$

Se calcula $K(m)$, $m = 1,2,\ldots,m$, y se detiene cuando

$$K(m + 1) > K(m)$$

es decir, el periodo en el que el costo promedio por periodo comienza a crecer. En el periodo 1 se ordena una cantidad que cumpla con la demanda de los siguientes m periodos; efeto es

$$Q_x = A + D_2 + \cdots + D_m$$

en general, Q. es la cantidad ordenada en el periodo *iy* cubre m periodos futuros. Si njo se emite la orden en el periodo i, entonces Q_x es cero. El proceso se repite en el periodo (m + |l)y continúa durante todo el horizonte de planeación.

Ejemplo 6-13. Método de Silver-Meal. James, el gerente de una tienda local de coniputadoras, estima que la demanda de discos de 3.5" para los próximos cinco meses será 100,100,5 3,50 y 210 cajas de 10 discos. Como la demanda es irregular, James aplica el método de Silver-Mea para ordenar la cantidad correcta. James tiene un costo de $50 por colocar la orden independienter lente de su tamaño, y estima que almacenar una caja durante un mes le costará $0.50. ¿Qué le puec e sugerir?

Solución. Los datos básicos para este problema son

$A = \$50$ $h = \$0.50$ por caja por mes

La demanda, D_1, para los siguientes cinco meses es

Mes	1	2	3	4	5
Demanda	100	100	50	50	210

Se aplica la fórmula de Silver-Meal para calcular *K(m):*

$$K(m) = 1/m\ (A + hD_2 + 2hD_3 + 3hD_A + \ldots + (m-1)hD_m)$$

1. $m = 1$

$$K(\backslash) = 50$$

2. $m = 2$

$$K(2) = (1/2)\ (50+(0.5)(l\ 00))$$
$$= 50 < 50 = K(\backslash),$$ continuar

3. $m = 3$

$$K(3) = (l/3)(50+(0.5)(100)+(2)(0.5)(50))$$
$$= 50 < 50 = K(2),$$ continuar

4. $m = 4$

$$K(4) = (l/4)(50+(0.5)(l\ 00)+(2)(0.5)(50) + (3)(0.5)(50))$$
$$= 56.25 > KQ) = 50,$$ DETENERSE

La primera cantidad a ordenar es

$$Q_x = 100+ 100+ 50 = 250$$

Se continúa con el procedimiento comenzando en el cuarto mes.

1. $m = 1$; comienza en el mes 4.

$$\#(1) = 50$$

2. m = 2

$$K(2) = (l/2)(50+(0.5)(210))$$
$$= 72.50 > K(1), \qquad \text{DETENERSE}$$

La cantidad de la segunda orden es $Q_4 = 50$, y se continúa con el procedimiento comenzando en el quinto mes.

1. $m = 1$; comienza en el mes 5.

$$K(l) = 50$$

Como no hay información adicional, el procedimiento se detiene con $Q_5 = 210$.

De acuerdo con las demandas de los cinco meses, se ordenará tres veces, al principio del primero, cuarto y quinto meses. Las cantidades a ordenar son $Q_j = 25$, $Q_4 = 50$ y $Q_5 = 210$. Sin embargo, cuando se disponga de cada nuevo pronóstico para un periodo posterior, las cantidades a partir del mes 5 se deben volver a calcular.

Cosío unitario mínimo (CUM). Este procedimiento es similar al heurístico de Silver-Meal. La diferencia radica en que la decisión se basa en el costo variable promedio por unidad en lugar de por periodo. Sea

$K' (m)$ = costo variable promedio por unidad si la orden cubre m periodos

Siguiendo el mismo razonamiento que en el caso de Silver-Meals,

$$K'(1) = \frac{A}{D_1}$$

$$K'(2) = \frac{A + hD_2}{D_1 + D_2}$$

$$K'(3) = \frac{A + hD_2 + 2hD_3}{D_1 + D_2 + D_3}$$

y en general

$$K'(m) = \frac{A + hD_2 + 2hD_3 + \cdots + (m-1)hD_m}{D_1 + D_2 + \cdots + D_m}$$

Igual que antes, la regla de detención es

$$K'(m+l) > K(m)$$

y

$$Q_x = D_l+D_2+"\text{-} + D_m$$

De nuevo, el proceso se repite a partir del periodo $(m + 1)$.

Solución. Los datos básicos son los mismos de antes.

1. $m = 1$; comienza en el mes 1.

$$K'(1) = A/D_1 = 50/100 = 0.5$$

2. $m = 2$

$$K'(2) = (50 + (0.5)(100))/(100 + 100)$$
$$= 0.5 \leq K'(1) = 0.5, \qquad \text{continuar}$$

3. $m = 3$

$$K'(3) = \{50 + (0.5)(100) + (2)(0.5)(50)\}/(100 + 100 + 50)$$
$$= 0.6 > K'(2) = 0.5, \qquad \text{DETENERSE}$$

La primera orden se coloca en el primer mes con

$$Q_1 = 100 + 100 = 200$$

El procedimiento continúa a partir del tercer mes.

1. $m = 1$; comienza en el mes 3.

$$K'(1) = (50)/(50) = 1$$

2, $m = 2$

$$K'(2) = (50 + (0.5)(50))/(50 + 50)$$
$$= 0.75 < K'(1) = 1, \qquad \text{continuar}$$

3. $m = 3$

$$K'(3) = (50 + (0.5)(50) + (2)(0.5)(210))/(50 + 50 + 210)$$
$$= 0.92 > K'(2) = 0.75, \qquad \text{DETENERSE}$$

El segundo punto para ordenar es el tercer mes y

$$Q_3 = 50 + 50 + 210 = 310$$

Como no se dispone de más información, el procedimiento se detiene. Se ordenará dos veces, una en el primer mes y otra en el tercero. Las cantidades a ordenar son 200 y 310, respectivamente.

Balanceo de periodo fragmentado (BPF). Este método intenta minimizar la suma del costo variable para todos los lotes. Recuerde del análisis del EOQ que si la demanda es uní forme, el costo de ordenar (preparar) es igual al costo de almacenar. Aunque este argumento es correcto para demanda uniforme, no es cierto para demanda irregular, en la que el inventario promedio no es la mitad del tamaño de lote. Sin embargo, puede proporcionar soluciones razonables para la demanda irregular.

Para obtener el costo de mantener el inventario se introduce el periodo fragmentado, definido como una unidad del artículo almacenada durante un periodo. Entonces, 10 unidades en

inventario durante un periodo son iguales a 10 periodos fragmentados, lo que es igual a 5 unidades en inventario durante 2 periodos. Sea

$$PF_m = \text{periodo fragmentado para } m \text{ periodos}$$

Así,

$$PF_X = 0$$
$$PF_2 = D_2$$
$$PF_3 = D_2+2D_3$$
$$PF_m = D_{2+}2D_{3+}\text{-.}+(m\text{-}l)D_m$$

El costo de mantener el inventario es $h(PF_m)$, y se quiere seleccionar el horizonte de pedidos wque cubra, en términos generales, el costo de ordenar *A,* esto es, elegir *m*tal que

$$A = h(PF_m)$$

o sea

$$PF_m = j$$

que también es la regla de detención. La razón *A/h* se llama "factor económico de periodo fragmentado". El tamaño de la orden es

$$Q_x = D_l + D_2 + \text{-} + D_m$$

y el proceso se repite comenzando con el periodo $m + 1$. El método heurístico BPF también se conoce como de costo total mínimo (CTM) y es uno de los que más se aplican en la industria.

Ejemplo 6-15. Balanceo de periodo fragmentado. Se repite el problema de James con la aplicación del método de balanceo de periodo fragmentado.

Solución. El factor de periodo fragmentado = *AI h* = 50/ 0.5 = 100 =FPF. Se calcula el valor fragmentado con la fórmula

$$PF_m = D_2+2D_3+3D_4 + \text{-}.. + (\text{«-1})Z>_M$$

1. Comenzando con el mes 1:

$$PF_X = 0$$
$$PF_2 = 100 < 100 = FPF$$
$$PF_3 = 100+(2)(50) = 200 > FPF \qquad \text{DETENERSE}$$

El punto para ordenar es en el mes 1, la cantidad a ordenar es

$$0, = 100+ 100 = 200 \text{ que}$$

cubre 2 meses.

2. Comenzando en el mes 3:

$$PF_X = 0$$
$$PF_2 = 50 < FPF$$
$$PF_3 = 50+(2)(210) = 470 > FPF \qquad \text{DETENERSE}$$

El segundo punto para ordenar es el mes 3 y la cantidad a ordenar es

$$Q_2 = 50 + 50 = 100 \text{ que}$$

también cubre dos meses.

Como el mes 5 es el último mes, se ordena la demanda del mes 5 al principio de ese mes. Se colocan tres órdenes en el periodo de cinco meses: en el primero, tercero y quinto mes, con cantidades a ordenar de 200,100 y 210, respectivamente. De nuevo, cuando se disponga de datos posteriores al mes 5, el resto de las cantidades debe volver a calcularse.

2.2.3 Algoritmo de Wagner-Whitin (WW)

Este algoritmo tiene el mismo objetivo que algunos enfoques heurísticos, minimizar *p* costo variable de inventario, el costo de ordenar (preparar) y el de mantener inventario durante el horizonte de planeación. La diferencia es que el algoritmo de Wagner-Whitin genera una solución de costo mínimo que conduce a una cantidad óptima a ordenar Q_i. El procedimiento de optimización está basado en programación dinámica; evalúa todas las maneras posibles de ordenar para cubrir la demanda en cada periodo del horizonte de planeación. Su "elegancia" estriba en que no considera todas las políticas posibles; para un horizonte de *n* periodos, ti número de políticas posibles es 2^{n}~^{l}. Se observa el hecho de que una orden debe satisfacer toda la demanda para cierto número de periodos. Esto es, una cantidad óptima a ordenar, digamos Q_i, satiface

$$Q_i = \sum_{k=i}^{j} D_k \qquad \text{para alguna } j \geq i$$

y

$$I_i Q_{i+1} = 0 \qquad \text{para toda } i = 0, 1, \ldots, n-1$$

Q_i es el número de unidades ordenadas en el periodo i para cubrir la demanda hasta el p eriodo *j*, con la siguiente orden colocada en el periodo *j* + 1. Este concepto, usado en los módulos heurísticos, reduce el número de políticas que se examinan a una cantidad del orden de *n*, lo cual significa que el algoritmo ignora muchas de las políticas.

Wagner-Whitin sustituye al EOQ para el caso de demanda irregular. Sin embargo, como es un poco difícil de entender, normalmente no se aplica en la industria. Su mayor ventaja es que sirve como estándar para medir la efectividad de otros algoritmos para tamaño dol lote dinámico.

Se establecerá formalmente el algoritmo usando la notación definida. Sea $K_{t;}$ e\ costo de colocar una orden para cubrir la demanda de los periodos *t, t* + 1,…,/, suponiendo que el inventario al principio del periodo *t* y al final del periodo / es cero. Matemáticamente, este costo es

$$K_{t,l} = A + h\left(\sum_{j=t+1}^{l} (j-t)D_j\right) \qquad t = 1, 2, \ldots, n;\ l = t+1,\ t+2, \ldots, n$$

Ahora se determina el costo mínimo del periodo 1 al / suponiendo que no debe haber inventario restante al final del periodo /. La ecuación para este mínimo se puede encontrar de ijianera recursiva, Si *K* * es este mínimo, estará dado por

$$K_l^* = \text{mín}_{t=1,2,\ldots,l}\{K_{t-1}^* + K_{t,l}\}, \qquad l = 1, 2, \ldots, N$$

K * se define como cero, y el valor de la solución de costo mínimo está dado por *K£.*

Considere el problema de James (ejemplo 6-13). Para / = 1 se tiene

$$K_{1,1} = A + h\left(\sum_{j=1+1}^{1}(j-1)D_j\right) = 50 + 0.5(0) = \$50$$

donde la suma de un índice mayor a uno menor (es decir, de 2 a 1) se define como cero. El costo óptimo, si no se tiene inventario al final del periodo 1, es

$$K_1^* = \text{mín}_{t=1}\{K_0^* + K_{1,1}\} = 0 + 50 = \$50$$

Para calcular $K_{1,2}$ y $K_{2,2}$ se tiene

$$K_{1,2} = A + h\left(\sum_{j=1+1}^{2}(j-1)D_j\right) = 50 + 0.5(100) = \$100$$

y

$$K_{2,2} = A + h\left(\sum_{j=2+1}^{2}(j-2)D_j\right) = 50 + 0 = \$50$$

Para calcular el costo mínimo para los primeros dos periodos se tiene

$$\begin{aligned} K_2^* &= \text{mín}_{t=1,2}\{K_{t-1}^* + K_{t,2}\} \\ &= \text{mín}\{K_0^* + K_{1,2},\ K_1^* + K_{2,2}\} \\ &= \text{mín}\{0 + 100,\ 50 + 50\} \\ &= \$100 \end{aligned}$$

Es sencillo realizar estas operaciones con una hoja de cálculo. En la tabla 6-8 se presentan los cálculos del ejemplo completos; los datos del problema se repiten para que sea claro. En lugar de calcular ÁT,,, se calculó $K_{t—x} + K_t$ ¡ en las celdas y K^* es el valor mínimo en cada columna. Los cálculos en una columna con índice menor deben completarse antes de comenzar con la siguiente columna.

Por ejemplo, existen varias soluciones óptimas alternativas, todas con un costo total de $225. Para encontrar las cantidades a ordenar, observe que el índice del renglón representa el periodo en el que se colocó la orden que cubre la demanda del periodo especificado por el índice de la columna. Se comienza con el último periodo (5) y se trabaja hacia atrás. Como el costo mínimo ($225) para el periodo 5 ocurre en el renglón 5, en el periodo 5 se ordena sólo pa-

TABLA 6-8
Ejemplo resuelto por el algoritmo de Waener-Whitin

Periodo, l	1	2	3	4	5
Demanda pronosticada, D_l	100	100	50	50	210
Costo fijo, A	50	50	50	50	50
Costo de inventario, h	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
t			$K_{t-1}^* + K_{t,l}$		
1	50	100	150	225	645
2		100	125	175	490
3			150	175	385
4				175	280
5					225
K_l^*	50	100	125	175	225

ra ese periodo (Q_5 = 210). La demanda del periodo 5 quedó satisfecha con una orden en el periodo 5, entonces se procede al periodo 4. El mínimo para la columna 4 ($175) se alearla en los renglones 2, 3 y 4, por lo que se tienen soluciones óptimas alternativas; se elige el renglón 3 de manera arbitraria. Así se ordena en el periodo 3 para los periodos 3 y 4 {Q_i =100). Corro se colocó una orden en el periodo 3, se examina a continuación el periodo 2, que también tiene mínimos alternativos ($100) en los renglones 1 y 2. Arbitrariamente se elige el renglón 1; s(! ordena en el periodo 1 para los periodos 1 y 2 (Q, = 200). El lector debe verificar que(£), = 100, Q_2 = 100, Q_3 = 100, Q_5 = 210), {Q_x = 100, Q_2 = 150, Q_4 = 50, Q_5 = 210)y {Q_x = 1^)0, Q_2 = 200, Q_5 = 210), todas son soluciones óptimas.

Sólo el método heurístico BPF obtuvo una solución óptima. El de Silver-Meal que ió cerca con un costo de $250, y el de CUM no fue efectivo ya que llegó a un costo total de $385, 71% mayor que el óptimo. Por supuesto, con un conjunto distinto de datos, lo más probable es que estos resultados sean diferentes.

Ahora es posible comparar los tres métodos heurísticos y la solución óptima par^ el problema de James; esto se hace en la tabla 6-9.

2.2.4 Regla de Peterson-Silver

Los métodos para tamaño del lote dinámico se usan para demanda irregular. ¿Cómo se puede saber que la demanda es irregular? ¿Con sólo mirar? Debe haber una mejor manera. Pesterson y Silver (1979) propusieron una medida útil de la variabilidad de la demanda, llamada coeficiente de variabilidad. Éste es

$$V = \frac{\text{Variancia de la demanda por periodo}}{\text{Cuadrado de la demanda promedio por periodo}}$$

Ellos demostraron que V se puede evaluar mediante

$$V = \frac{n\sum_{t=1}^{n} D_t^2}{\left(\sum_{t=1}^{n} D_t\right)^2} - 1$$

donde D_t es la demanda pronosticada discreta para el periodo y n es el horizonte de placación.

Peterson y Silver sugieren la siguiente "prueba de irregularidad":

Si $V < 0.25$, se usa el modelo EOQ con D como la demanda estimada.

Si $V > 0.25$, se usa un modelo de tamaño del lote dinámico.

TABLA 6-9
Comparación de métodos de tamaño del lote dinámico

	Periodo					
Método	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**Costo**
Silver-Meal	Q_1 = 250			Q_4 = 50	Q_5 = 210	$250
CUM	Q_1 = 200		Q_3 = 310			$385
BPF	Q_1 = 200		Q_3 = 100		Q_5 = 100	$225
Wagner-Whitin*	Q_1 = 100	Q_2 = 200			Q_5 = 210	$225

* Una solución óptima

Al aplicar esta regla a los datos del ejemplo 6-13, se obtiene

$$\sum_{t=1}^{5} D_t^2 = 69\,100 \qquad \left(\sum_{t=1}^{5} D_t\right)^2 = 260\,100$$

$$V = \frac{5 \times 69\,100}{260\,100} - 1 = 0.328 > 0.25$$

Este resultado justifica el uso de métodos de tamaño del lote dinámico para el ejemplo.

SECCIÓN 2.2 EJERCICIOS

6.40. En las siguientes tablas se dan los pronósticos de demanda para doce semanas:

Semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Demanda	50	70	30	90	80	10	100	55	60	65	80	45

Semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Demanda	120	80		40			75	85		60		90

a) *Demanda de periodo fijo.* Para ambas tablas, evalúe la cantidad a ordenar para 4, 8 y 12 se manas de demanda.
b) *Cantidad a ordenar por periodo.* Para ambas tablas, evalúe la COP para Q = 100,150,250, respectivamente.
c) Para ambas tablas, evalúe la cantidad a ordenar usando la regla de lote por lote.
d) Basándose en sus respuestas, haga observaciones sobre los tres métodos.

6.41. La librería de la universidad vende varios posters. Uno de ellos, el "Jefe Huncho", tiene los siguientes pronósticos de demanda para los próximos 12 meses.

Mes,/	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Demanda, D,	55	70	105	120	115	95	100	75	120	75	60	45

Colocar una orden cuesta $20, el costo de un póster es de $2.00 y el costo anual de mantener inventario es 20%.

Para cada uno de los siguientes métodos desarrolle el patrón de reabastecimiento para cubrir los 12 meses y el costo asociado a cada patrón.

a) Método Silver-Meal
b) Costo unitario mínimo
c) Balanceo de periodo fragmentado

6.42. La librería de la universidad también tiene pronósticos de 12 meses para otro póster, el "Jardín de rosas del edén"

Mes,/	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Demanda, D_1	580	440	288	202	150	102	68	50	38	24	15	12

Colocar una orden cuesta $20, el costo de un póster es de $2.00 y el costo anual de mantener el inventario es 20%

Para cada uno de los siguientes métodos, desarrolle el patrón de reabastecimiento para cubrir los 12 meses y el costo asociado a cada patrón.

a) Método Silver-Meal
b) Costo unitario mínimo
c) Balanceo de periodo fragmentado

6.43. Utilice los resultados de los ejercicios 6.41 y 6.42 para analizar el comportamiento de los tres mé todos con los distintos patrones de demanda.

6.44. Se proporciona el pronóstico de demanda de los calibradores que fabrica Lagrange Fou^dry para las próximas seis semanas. La máquina de moldeo que hace los calibradores se usa para cjtros pro ductos y debe prepararse cada vez que aquéllos se producen. Se necesitan dos mecánico^ durante una hora para la preparación. Incluyendo prestaciones, un mecánico le cuesta a la compañía $25 por hora. Los calibradores se venden en $3.00 cada uno. Los costos de almacenaje para un calibra dor se estiman en $0.40 a la semana. Los costos de papeleo agregan alrededor de $0.07 por unidad por semana y el costo de oportunidad, seguros, etcétera, se estima a una tasa de 50% anu il del va lor del artículo.

Semana,/	1	2	3	4	5	6
Demanda, *D,*	100	100	200	100	120	80

o) ¿Qué tamaños de lote recomendaría?
b) Suponga que se puede invertir $3000 y reducir el costo de preparación un 50%. Si 1^ compañía usa un periodo de recuperación de un año, ¿debe invertir en la reducción de laj preparación? Establezca cualesquiera suposiciones que tenga que hacer.

6.45. Rocky Mountain Wire firmó órdenes de rollos de cable de cobre calibre 12 para los siguientes seis periodos de planeación. Cada vez que fabrica el cable se realiza una preparación que cuesta $ 150. Un equipo de reducción de preparaciones ha trabajado para reducir el tiempo de preparación e im plantará sus resultados dentro de tres periodos; el costo de preparación se reducirá a $100. El cos to actual de fabricación de un rollo es $5.00, pero un aumento en el precio del cobre incrementará este costo 20% en el periodo 3. Un nuevo contrato de trabajo se llevará a cabo en el periodo 5, au mentando $1 al costo por rollo. El costo de almacenar un rollo es $ 1 en los primeros dos periodos y $2 en los subsecuentes. Dé una política de tamaño de lote óptima para Rocky Mountiin.

Periodo,/	1	2	3	4	5	6
Demanda, *D,*	60	100	10	200	120	15

6.46. Tydown produce sistemas de anclaje para instalaciones de almacenamiento, casas móv iles, etcé tera. Tienen un contrato con la compañía de energía eléctrica local para abastecerlos de ¡inclas pa ra postes de servicio. La compañía de energía eléctrica ha ordenado anclas para los siguientes seis meses. La cantidad, el costo de preparación, el costo variable y los costos de almacenar son:

Mes,/	1	2	3	4	5	6
Demanda, *D¡*	1500	100	700	1200	200	1700
Costo fijo, *A,*	150	150	150	200	200	200
Costo variable, *c,*	10.0	10.5	10.0	11.0	11.0	11.0
Costo de almacenar, *h,*	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5	1.5

¿Cuántas anclas debe producir Tydown cada uno de los siguientes seis meses para minimizar su costo total?

6.47. Utilice la regla de Peterson-Silver para verificar si los patrones de demanda en los ejercicios 6.40-6.42 son irregulares.

2.3 Resumen

En la tabla 6-10 se presenta un resumen de los principales modelos de decisiones de cantidad estudiados en esta sección.

3 DECISIONES DE TIEMPO

Esta sección analiza la segunda decisión más importante en los sistemas de inventarios: cuándo ordenar. Esta decisión tiene efecto no sólo en el nivel de inventario y, por ende, en el costo del inventario, sino también en el nivel del servicio que se proporciona al cliente. Las decisiones de tiempo juegan un papel primordial en las filosofías MDS; afectan el costo y los elementos "a tiempo todo el tiempo", dos ingredientes importantes de la satisfacción del cliente.

Al igual que en las decisiones de cantidad, se incluyen modelos "clásicos" para ayudar a entender el comportamiento de los sistemas de inventario respecto a las decisiones de tiempo. Se decidió incluir el concepto general de estrategias de servicio de inventarios para resaltar el análisis de los distintos métodos.

Se estudiarán los modelos bajo tres categorías importantes:

- Decisiones de una sola vez
- Sistemas de revisión continua, que son sinónimo de decisiones de tiempo continuo
- Sistemas de revisión periódica, que son sinónimo de decisiones intermitentes

Todos los modelos manejan un solo artículo, pero se pueden extender a artículos múltiples y muchos de ellos manejan demanda estocástica. La figura 6-13 muestra la estructura detallada de esta sección.

3.1 Decisiones de una sola vez

Las situaciones de decisiones de una sola vez son muy comunes en los ambientes tanto de manufactura como de venta al menudeo. Con frecuencia el problema se relaciona con bienes estacionales, que tienen demanda sólo durante periodos cortos. El valor del producto declina al final de la temporada e incluso puede ser negativo. El tiempo de entrega puede ser más largo que la temporada de ventas, por lo que si la demanda es más grande que la orden original, no se puede hacer un pedido urgente de productos adicionales. Entonces, existe una sola oportunidad de ordenar. Un ejemplo común es un puesto de periódicos. Si el dueño no compra suficientes periódicos para satisfacer la demanda, pierde su ganancia. Si ordena demasiados, el exceso no se vende y paga una sanción por regresarlos. Una situación similar ocurre con la venta de árboles y artículos navideños. Así, este modelo se llama con frecuencia "modelo del voceador" o "modelo del árbol de Navidad". En la manufactura, el problema equivalente sería ¿cuántos productos terminados deben tenerse en inventario?

TABLA 6-10
Decisiones de cantidad: resumen

Método	Demanda	Solución	Objetivo	Cantidad	Aplicación	Observaciones
Cantidad económica a ordenar	Uniforme	Óptima	Minimizar el costo total	$\sqrt{\frac{2AD}{h}}$	Materia prima, producto terminado, venta	Modelo básico de inventarios
Cantidad económica a producir	Uniforme	Óptima	Minimizar el costo total	$\sqrt{\frac{2AD}{h\left(1-\frac{D}{\psi}\right)}}$	Producción	Tasa de producción finita
Descuentos por cantidad	Uniforme	Óptima	Minimizar el costo total	$\sqrt{\frac{2AD}{h}}$	Materia prima, producto terminado, venta	Descuentos de precios
Restricción de recursos	Uniforme	Óptima	Minimizar el costo total	$\sqrt{\frac{2AD}{h+2c\lambda}}$	Materia prima, producto terminado, venta	Artículos múltiples
Demanda de periodo fijo	Irregular	Arbitraria	Orden conveniente	Demanda de periodo arbitrario	Materia prima, en proceso, producto terminado, venta	
Cantidad a ordenar por periodo	Irregular	Arbitraria	Orden conveniente	Demanda calculada del periodo	Materia prima, en proceso, producto terminado, venta	
Lote por lote	Irregular	Arbitraria	Costo de almacenaje	D_1	Materia prima, en proceso, producto terminado, venta	Aplicación amplia
Silver-Meal	Irregular	Heurística	Costo/periodo	$\sum D_t$	Materia prima, en proceso, producto terminado, venta	
Costo unitario mínimo	Irregular	Heurística	Costo/unidad	$\sum D_t$	Materia prima, en proceso, producto terminado, venta	
Balaceo de periodo fragmentado	Irregular	Heurística	Costo balanceado	$\sum D_t$	Materia prima, en proceso, producto terminado, venta	Aplicación amplia
Wagner-Whitin	Irregular	Óptima	Minimizar el costo total	$\sum D_t$	Materia prima, en proceso, producto terminado, venta	Comparación

Todos los modelos de un solo artículo se pueden repetir para una población independiente de *n* artículos.

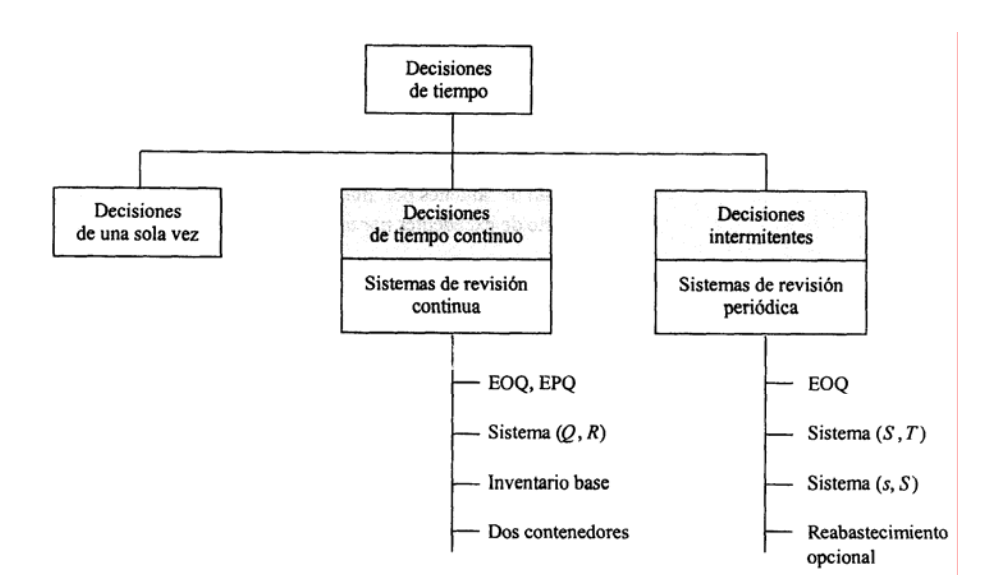


FIGURA 6-13
Estructura de las decisiones de tiempo

Debe decidirse el número de artículos a ordenar antes del periodo de ventas, que puede ser un día, una semana o cualquier otro periodo. Si la demanda se conoce (el caso deterministico), el problema es trivial; se ordena el número exacto de unidades que se demanda. La situación práctica, y por lo tanto la de interés, es cuando la demanda *exacta* es desconocida, pero puede describirse como una variable aleatoria. Éste es el caso *estocástico.* Para dar un panorama claro, considere el ejemplo 6-16.

Ejemplo 6-16. Decisiones de una sola vez. La señora Kandell ha estado en el negocio de árboles de Navidad durante años. Ella lleva un registro del volumen de ventas por año y ha elaborado una tabla (tabla 6-11) de la demanda de estos árboles y su probabilidad. Es evidente que la demanda nunca fue menor que 22 árboles ni mayor que 36.

Solución. La demanda es una variable incontrolable y la variable de decisión es Q, la decisión de una sola vez sobre la cantidad que se debe ordenar. El enfoque de solución es un análisis económico marginal; se balancean los faltantes y los excedentes. La cantidad óptima a ordenar, Q^*, se encuentra optimizando el costo esperado, ya que se tiene un medio ambiente estocástico.

TABLA 6-11
Demanda de árboles de navidad

Demanda D	**Probabilidad** $f(D)$
22	0.05
24	0.10
26	0.15
28	0.20
30	0.20
32	0.15
34	0.10
36	0.05

Sea D = demanda durante el periodo; una variable aleatoria con función de densidad de probabilidad *f(D) F{D)* - función de probabilidad acumulada de *D*, es decir, la probabilidad de que la demanda sea menor o igual que *D*

7t = costo de faltantes por unidad que falta al final del periodo *%* = costo de excedentes por unidad que sobra al final del periodo

El costo por faltantes puede ser la ganancia perdida y la pérdida de la buena voluntad. El costo del excedente es el costo unitario más cualquier costo adicional para deshacerse del excedente, menos cualquier ingreso (valor de recuperación) que se pueda obtener. El costo de compra pu(de ignorarse porque no afecta la solución óptima, o bien, considerarse de manera implícita en los costos de excedentes o de faltantes. Se supone que no hay costo por colocar una orden. Como *Q* es la variable de decisión, el costo esperado de excedentes es

$$F(Q)c_0$$

y el costo esperado por faltantes es

$$[1 - F(Q)]\pi$$

El valor óptimo de *Q* en este caso el punto en donde estos dos costos son iguales

$$F(Q^*)c_0 = [1 - F(Q^*)]\pi$$

lo que conduce a

$$F(Q^*) = \frac{\pi}{\pi + c_0}$$

La razón de costo en la ecuación anterior se llama **razón crítica** y es un número entre 0 y 1. La razón crítica es la probabilidad de satisfacer la demanda durante el periodo si *Q** se compra para ese periodo, que no es lo mismo que la proporción de la demanda satisfecha.

Para calcular *Q** se debe usar la distribución de probabilidad acumulada, que es c&racterística de los modelos estocásticos de inventarios. Para ilustrar esto se continúa con e| ejemplo 6-16.

Ejemplo 6-16 (continuación). Decisiones de una sola vez. La señora Kandell estima que si com pra más árboles de los que puede vender, le cuesta alrededor de $40 por el árbol y por deshacerse de éste. Si la demanda es más alta que el número de árboles que ordena, pierde su gananciaIde $40 por árbol.

Solución. Se determina *Q ** calculando primero la probabilidad acumulada de la demanda, la cual aparece en la tabla 6-12. El valor crítico es

$$\frac{\pi}{c_0 + \pi} = \frac{40}{40 + 40} = 0.50$$

Debe encontrarse el valor de *Q ** para el que *F{Q *)* = 0.50. De la tabla se observa que *Ó ** = 28, la cantidad de árboles que la señora Kandell debe comprar.

TABLA 6-12
Probabilidad acumulada

Demanda D	**Probabilidad** $F(D)$
22	0.05
24	0.15
26	0.30
28	0.50
30	0.70
32	0.85
34	0.95
36	1.00

Desarrollo matemático. La razón crítica también se puede obtener matemáticamente. Sea /(Z))una función de distribución de probabilidad continua de la demanda. La cantidad vendida durante el periodo es

$$\text{mín}\ \{Q, D\}$$

por lo tanto, la posición del excedente es

$$Q - D \qquad \text{si } D < Q$$

y la posición del faltante es

$$D - Q \qquad \text{si } D > Q$$

Estas condiciones se pueden escribir como sigue:

$$\text{Excedente:} \qquad \text{máx}\ \{Q - D, 0\} = \begin{cases} Q - D & \text{si } Q > D \\ 0 & \text{si } Q \leq D \end{cases}$$

$$\text{Faltante:} \qquad \text{máx}\ \{D - Q, 0\} = \begin{cases} 0 & \text{si } Q \geq D \\ D - Q & \text{si } Q < D \end{cases}$$

Esto da la siguiente función de costo total

$$K(Q) = c_0\ \text{máx}\ \{Q - D, 0\} + \pi\ \text{máx}\ \{D - Q, 0\}$$

El costo esperado es

$$E\{K(Q)\} = c_0 \int_0^Q (Q - D) f(D)\, dD + \pi \int_Q^\infty (D - Q) f(D)\, dD$$

Para obtener Q^*, se hace

$$\frac{dE\{K(Q)\}}{dQ} = 0$$

Esto (usando la regla de Leibnitz para derivar integrales) lleva a

$$c_0 \int_0^Q f(D)\, dD - \pi \int_Q^\infty f(D)\, dD = 0$$

o

$$c_0 F(Q) - \pi\{1 - F(Q)\} = 0$$

Rearreglando términos se tiene

$$F(Q^*) = \frac{\pi}{c_0 + \pi}$$

Éste es el mismo resultado que el que se obtuvo. Calculando la segunda derivada se tjene

$$\frac{d^2E(K(Q))}{dQ^2} = (c_0 + \pi)f(Q)$$

Si c0 + TI > O, entonces la segunda derivada es siempre no negativa, y *E{K(Q)}* es convexa con un mínimo en g*.

El modelo básico de decisión de una sola vez se puede aplicar en diferentes ambientes. En el siguiente ejemplo se considera el caso en el que la demanda es una variable aleatoria con tinua.

Ejemplo 6-17. Decisión de una sola vez: versión continua. Los estudiantes de último año planean vender camisetas para recaudar dinero destinado a la conferencia regional. Se supone tiue la demanda de camisetas es igualmente probable para cualquier número entre 48 y 72. Cadaj camiseta cuesta $3.50 y se venderá en $5.00. Si no se compran suficientes camisetas, el único costo ^erá la ganancia perdida. Como estas camisetas tienen el logo de la conferencia, se piensa que las (que no se vendan antes del evento se podrán vender a $2.50. Debido al alto costo de preparación sólo| se puede hacer un pedido.

Solución. Primero se establecen los parámetros para este problema. Se observa que *f(p)* es una distribución uniforme, de manera que

$$f(D) = \frac{1}{b-a} = \frac{1}{24}$$

$\pi = 5 - 3.50 = \$1.50$, que es igual a la ganancia perdida.
$c_0 = 3.50 - 2.50 = \$1.00$, la diferencia entre el costo unitario y el rendimiento unitario.

Esto da una razón crítica de

$$\frac{\pi}{c_0 + \pi} = \frac{1.5}{1 + 1.5} = 0.60$$

Por lo tanto, el número de camisetas que deben ordenarse es

$$F(Q^*) = \int_{48}^{Q^*} \frac{1}{24}\, dx = 0.60$$

Integrando se tiene

$$\frac{Q^* - 48}{24} = 0.60$$

y despejando Q^* se obtiene

$$Q^* = 62.4 \approx 62$$

El número de camisetas no vendidas después de la conferencia que los estudiantes esperan es

$$\int_{48}^{Q^*} (Q^* - D) f(D)\, dD = \frac{1}{24}\int_{48}^{62} (62 - D)\, dD$$

$$= \frac{62}{24} D\Big|_{48}^{62} - \frac{D^2}{24 \times 2}\Big|_{48}^{62}$$

$$= 4.08 \approx 4$$

De manera similar, el número esperado de camisetas faltantes es

$$\int_{Q^*}^{72}(D - Q^*)f(D)\,dD = \frac{1}{24}\int_{62}^{72}(D - 62)\,dD$$
$$= \frac{D^2}{24 \times 2}\bigg|_{62}^{72} - \frac{72}{24}D\bigg|_{62}^{72}$$
$$= 2.08 \approx 2$$

Entonces, el costo total esperado es

$$E\{K(Q^*)\} = E\{K(62)\} = 1 \times 4 + 1.5 \times 2 = \$7.00$$

y la ganancia esperada es

$$E\{\text{ganancia}\} = 62 \times 1.5 - 7 = \$86.00$$

El caso de inventario inicial. El análisis anterior supuso que no se tenía inventario disponible al principio del periodo. Si existen /unidades al inicio (digamos, adornos de Navidad del año anterior), entonces se reduce la cantidad a ordenar justo por esa suma, es decir, se ordenan

$$\text{máx}\{(0^*-/),\ 0\}$$

En este caso, Q^* es el inventario meta al principio del periodo.

SECCIÓN 3.1 EJERCICIOS

6.48. El restaurante Lakeshore planea ordenar tartas para el 4 de julio. Le costará $3.50 cada tarta, y se venderán por $10.00. Una tarta que se queda se puede vender a una agencia de ayuda social en $2.00. La siguiente tabla proporciona la demanda potencial y sus probabilidades, a partir de datos históricos.

Demanda, D	250	300	350	400	450	500
Probabilidad, $f(D)$	0.25	0.20	0.20	0.15	0.10	0.10

a) ¿Qué valor usaría, si lo hiciera, para el costo de la demanda insatisfecha?
b) Si el restaurante compra 350 tartas, ¿cuál es la ganancia esperada?
c) ¿Cuántas tartas les recomendaría que compraran?
b) Muestre cómo se puede manejar el costo de ordenar en el ejercicio del voceador.

6.49. El supermercado vende leche descremada que le entregan diario. La demanda diaria tiene una dis tribución uniforme entre 100 y 200 galones. La tienda paga por la leche $ 1.0 y la vende en $2.10. Al final del día, la leche que se queda se vende a una compañía química en $0.25 el galón. Si ocu rren faltantes, los clientes comprarán leche semidescremada en su lugar. La ganancia en esta últi ma es $0.50 por galón. ¿Cuánta leche deben comprar?

6.50. Una tienda de un poblado apartado en Nepal sirve como el último punto de abastecimiento para quienes escalan los Himalaya. La temporada de alpinismo es corta y la tienda va reuniendo el in ventario antes de que la temporada comience. Debido a su lejanía, no es posible que reciba reabas tecimiento durante la temporada.

Entre los artículos almacenados tiene cajas de galletas. Se estima que la demanda tiene distribución uniforme entre 200 y 400, es decir,

$$f(D) = \frac{1}{200} \qquad 200 \leq D \leq 400$$

$$f(D) = 0 \qquad \text{de otra manera}$$

La tienda compra las galletas a $2.00 la caja y las vende a $8.00 la caja. Las cajas que no se venden se regalan a una agencia de ayuda social. El dueño de la tienda estima que incurre en una sanción de $ 1.00 por cada caja no vendida por concepto de manejo.

a) Encuentre el número de cajas que debe ordenar la tienda para maximizar la ganancia.
b) Encuentre el número esperado de cajas que se regalarán si se compra la cantidad óptima.
c) Encuentre el número esperado para la cantidad óptima y la ganancia esperada si se ordenara una cantidad igual a la demanda esperada. Explique la diferencia.

6.51. La Litengine Company fabrica motores de pistones para un equipo de vuelo ultraligeró. La em presa está estudiando la posibilidad de realizar una última corrida de producción de un modelo an tiguo que se va a eliminar en un año.

El costo unitario de producción es $ 1000 y el motor se vende en $ 1800. Los motores ño vendidos se llevarán a un deshuesadero, a un costo por transporte y manejo de $ 180 por unidad. El deshuesadero paga $ 110 a Litengine por cada motor. Litengine estima una pérdida de buena voluntad de $500 por cualquier faltante.

El patrón de demanda de los motores es exponencial con función de densidad de probabilidad

$$f(d) = \frac{1}{75}e^{-D/75} \qquad D \geq 0$$

a) Encuentre el lote óptimo de producción que maximice la ganancia esperada.
b) Encuentre el número esperado de motores no vendidos.
c) Encuentre la ganancia esperada debida a la cantidad óptima y la ganancia esperada si se orde nara una cantidad igual a la demanda esperada

6.52. Con referencia al ejercicio 6.51, suponga que existen 20 motores en el inventario de producto ter minado y que el costo de preparación para una corrida de producción es de $2400. Evalí le de nue vo a) y b).

6.53. La Florería Parker promete a sus clientes entregar en un lapso de cuatro horas en todas las órdenes de arreglos florales. Todas las flores se compran el día anterior y Parker las recibe a las ¡8:00 de la mañana del día siguiente. La demanda diaria de rosas es la siguiente:

Docenas de rosas	Probabilidad
7	0.1
8	0.2
9	0.4
10	0.3

Parker compra las rosas a $5.00 la docena y las vende a $15.00. Todas las rosas qu¿ no vende se donan a un hospital local. La política de la tienda es comprar rosas a un competidor a $ 15.00 la docena si un cliente ordena rosas y Parker no tiene. Esto cuesta $2.00 por docena. ¿CuáJ es el costo esperado por faltantes de Parker?

6.54. FunSki es una tienda de deportes en Leech Lake, Minnesota. Sus ventas principales han sido motos de nieve, patines de hielo y equipo para esquiar. Recientemente, se tomó la decisión de vender acuamotos para el verano. Las acuamotos se compran en $2000, incluyendo envío, y se venden en $2500. Como el lago está lejos, sólo se hará un envío. Un estudio de mercado indica que las ventas

entre 500 y 600 son igualmente probables. Si FunSki no puede satisfacer la demanda, incurrirá en un costo de $250 por la pérdida de buena voluntad. Al final de junio y hasta el siguiente verano es poco probable que se vendan acuamotos, por lo que un distribuidor de Fort Lauderdale está de acuerdo en comprar todas las unidades no vendidas en $1800 cada una. Cuesta $50 enviar cada acuamoto de Leech Lake a Fort Lauderdale.

a) ¿Cuál es la cantidad óptima a comprar?
b) ¿Cuál es el número esperado de faltantes?
c) ¿Cuál es el costo total de este plan?

6.55. La Evergreen Company es propietaria de unos acres de arbustos que se cosechan y venden cada primavera. La compañía estima que el costo de podar y cortar los árboles es de $2.50 por árbol. El costo promedio de mandarlos al distribuidor es alrededor de $0.50 por árbol, y la compañía recibe cerca de $5.00 por árbol que ordena el distribuidor. Sin embargo, los arbustos que se cortan y no se venden al distribuidor representan una pérdida total. No se incurre en costos de envío si no se venden. La distribución de la demanda histórica es normal con media de 24 000 y desviación estándar de 1500.

a) ¿Cuántos arbustos deben cortarse para maximizar la ganancia?
b) ¿Cuál es el número esperado de arbustos "perdidos"?

3.2 Sistemas de revisión continua

Los sistemas de revisión continua se introdujeron en la sección 1.5. Para examinar estos sistemas, se definen dos nuevas variables de estado para el inventario:

X, = posición del inventario en el tiempo *t*
O, = posición de órdenes colocadas en el tiempo *t,* algunas veces llamada la **"tubería"** del inventario

Recuerde que i, es el inventario disponible en el tiempo < y 5, es el nivel de faltantes (órdenes atrasadas) en el tiempo *í.* Entonces

$$X, =/, +O, -B,$$

Ya sea/, o *B,* o ambos serán cero en cualquier tiempo. Básicamente, la diferencia entre *X, el,* es que *X,* considera el inventario como en una tubería. Sea

R = punto de reorden, el nivel de *X,* cuando se coloca una orden La

decisión de tiempo, cuándo ordenar, es

si *X,* < *R,* entonces se coloca una orden de *Q*unidades

R determina el momento de la decisión de cantidad. Estos sistemas se llaman sistemas *(Q, R*); la política está definida por dos decisiones. La decisión de cantidad se analizó en la sección anterior y el punto de reorden es el tema de esta sección. Deben observarse dos cosas:

- La decisión de tiempo considera la **posición del inventario** total y no sólo del inventario disponible *(un error muy común en la práctica).*
- La cantidad ordenada, *Q,* se puede determinar por cualquier método para el tamaño del lote.

En primer lugar, se analizarán los sistemas de revisión continua en un ambiente determinístico y después se estudiará el caso estocástico.

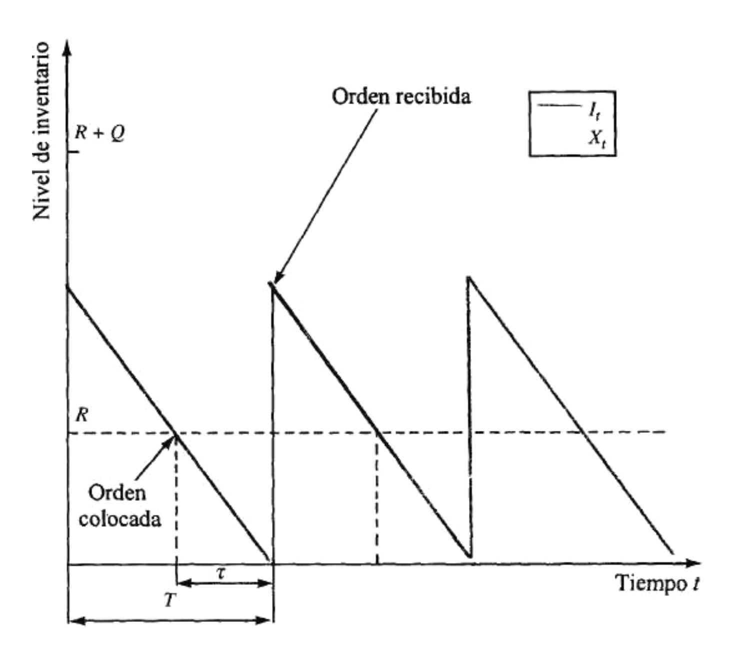


FIGURA 6-14
EOQ: /„ X_t

3.2.1 De nuevo EOQ, EPQ

En la sección 6.2.1 se obtuvieron la cantidad económica a ordenar y la cantidad económica a producir con tiempo de entrega cero. En esta sección se permitirá que el tiempo de en xega sea distinto de cero, pero se supondrá que es una constante conocida, digamos *x* . El lapso de una orden —expresado en las mismas unidades que los otros datos— es el tiempo que transcurre entre colocar la orden y su recepción.

Todavía se supone que las unidades ordenadas llegan al mismo tiempo T unidades después de colocar la orden. La demanda durante el tiempo de entrega se conoce con certidunjibre. Como antes la demanda anual es uniforme y se denota por *D.*

Primero se examina el caso del EOQ. Si se quiere que la cantidad *Q* llegue cuaádo se ha agotado todo el inventario, se establece

$$\boldsymbol{R = Dx}$$

Si no se permiten faltantes y no hay otras órdenes en camino (en la tubería), al colocar una orden, entonces

$$X, = /,$$

y la decisión de tiempo es colocar la orden siempre que

$$\boldsymbol{I, < Ln}$$

La figura 6-14 describe el comportamiento de /, y X_t a través del tiempo.

En esta figura la suposición tácita es que $x < T$ (tiempo de ciclo), es decir, exist^ a lo más una orden en camino. Si $x > T$, la situación, de alguna manera, es más compleja, coriio se ilustra en el ejemplo 6-18.

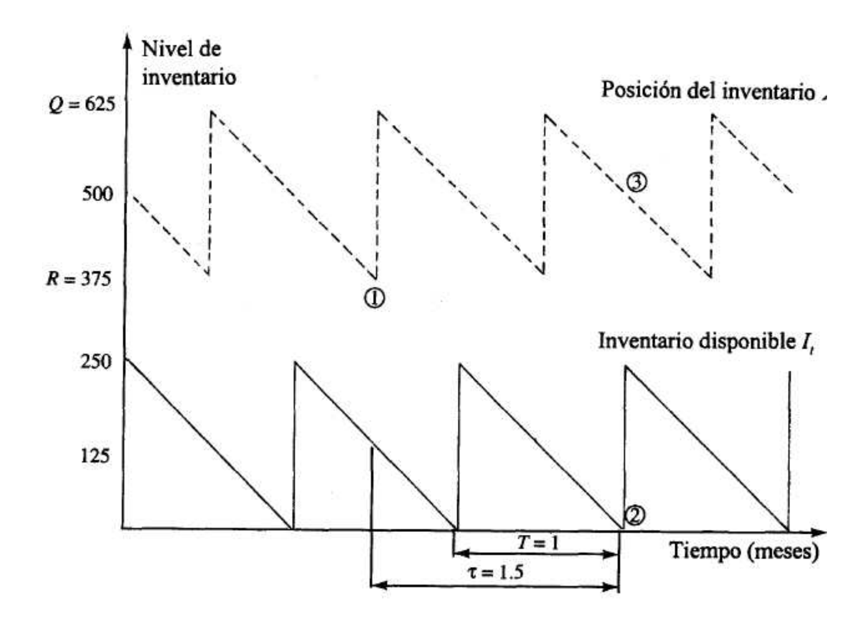


FIGURA 6-15
Geometría del inventario

Ejemplo 6-18. EOQ con tiempo de entrega. Larry ordena cierto fertilizante para su cosecha a una compañía local. La utilización anual uniforme es de alrededor de 3000 libras, y cada libra cuesta $3.00. Larry gasta alrededor de $12.50 al procesar cada orden. Por lo general, tiene que esperar mes y medio para recibir la orden. Estima que su costo de mantener el inventario es 40% anual. Se mostrará el comportamiento del inventario en este caso.

Solución

A = $12.50 D = 3000
Ib por año i = 40%
anual
c = $3.00 -> h = $1.20 por libra por año x
= 1.5 meses = 1.5/12 años = 1/8 años

$$\text{EOQ} = \sqrt{\frac{2AD}{h}} = \sqrt{\frac{(2)(12.5)(3000)}{1.2}} = 250$$

El tiempo de ciclo T es igual a 250/3000 = 1/12 años = 1 mes. El punto de reorden es R

= (1.5/12)(3000) = 375 libras

Observe que el tiempo de entrega de la orden, 1.5 meses, es mayor que el tiempo de ciclo. Esto se muestra en la figura 6-15.

En el punto *l,X,* =*R*, se emite una orden por Q = 250 unidades, haciendo *X,* = R + 250 = 625. Note que /, no se afecta, puesto que no se hicieron cambios en el inventario disponible. La orden colocada en el punto 1 llega en el punto 2 después de τ = 1.5 meses. Justo en el momento en que el inventario disponible llega a cero, se reabastece hasta 250. En este punto *X,* no cambia, porque /, + O_t sigue igual. Además, justo antes del punto 3 se tienen dos órdenes pendientes en *O,*, pero después del punto 3 sólo hay una orden pendiente. (¿Por qué?)

Para el EPQ, el argumento es similar. Se hace

$$R = D\tau$$

donde τ es el tiempo de entrega requerido para preparar la nueva corrida de producción). Cuando la posición del inventario es menor o igual que *R*, se inicia una nueva orden de producción. No obstante, debido a la tasa de reabastecimiento finita, *X*, se comporta diferente, cómo se muestra en la figura 6-16.

Tanto para el EOQ como para el EPQ con un tamaño de faltantes máximo de *b*, la decisión de tiempo es la misma. El punto de reorden se convierte en

$$R = D\tau - b$$

Ambos casos suponen que todo se conoce con certidumbre. En realidad, ambas demandas y tiempos de entrega pueden variar. Si llega una orden después de lo esperado o la demanda durante el tiempo de entrega es mayor que la esperada, pueden tenerse faltantes. Para evadir esto, se puede mantener un inventario de seguridad.

Se vio (sección 1.1) el papel del inventario de seguridad como protección contra la inc^rtidumbre en la demanda y el tiempo de entrega. Se explorará más este tema.

Se definió el inventario como un "amortiguador" entre dos procesos —abastecimiento y demanda—. Como tal, el inventario es una función de servicio. El concepto más seácillo de servicio es que siempre que un cliente necesite un artículo del inventario, esté ahí. En ¿ste caso el servicio es perfecto y el objetivo se cumple. El inventario de seguridad es inventarié adicio-

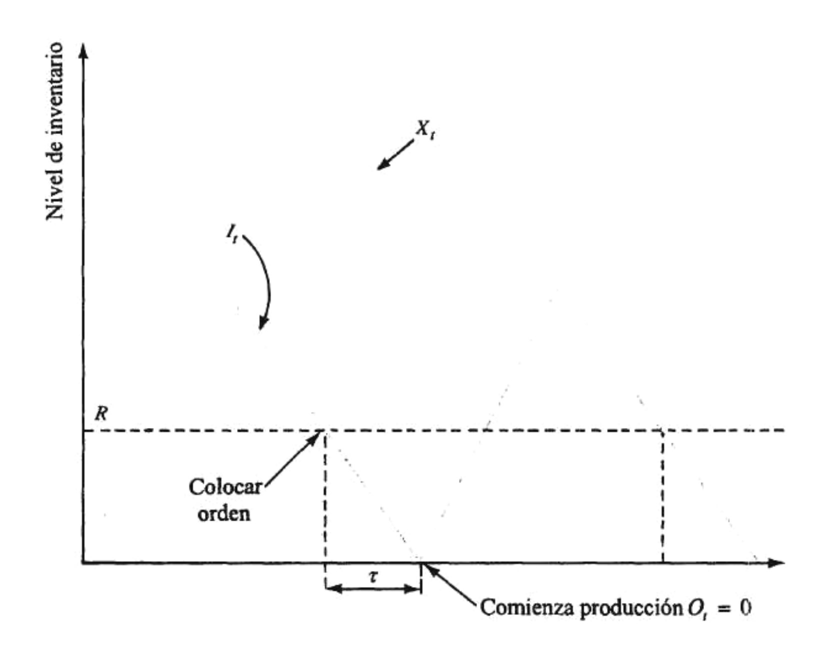


FIGURA 6-16

EPQ: /„ *X*,

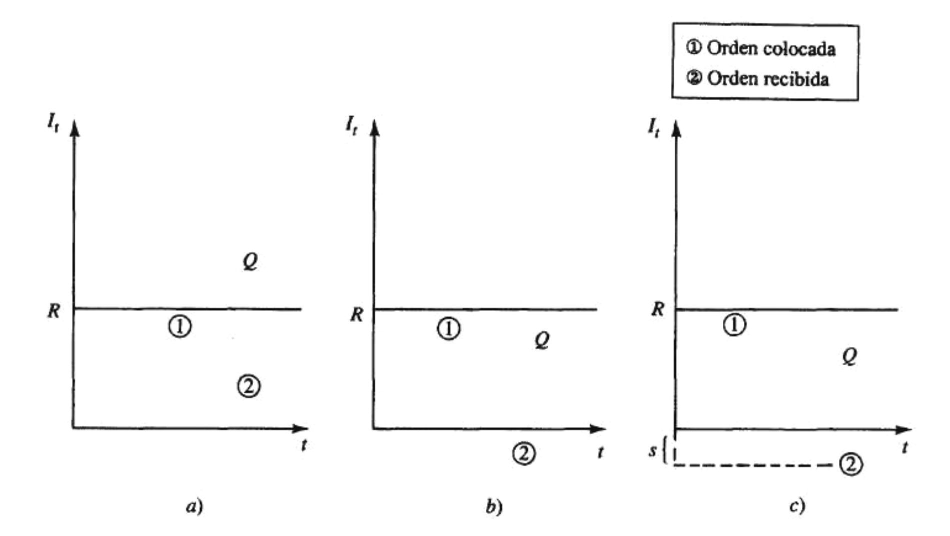


FIGURA 6-17
Configuraciones de inventarios

nal para asegurar que se cumple el objetivo de servicio. Sin embargo, más inventario significa más costo de mantenerlo y menos oportunidad de que un cliente se enfrente a un faltante. Todo se reduce a un *trueque,* el de cuánto servicio proporcionar comparado con el costo. Más adelante se desarrollarán herramientas para ayudar al administrador a tomar esta decisión de trueque. La "prueba de servicio" para un inventario no se hace cuando el inventario está en su máximo nivel, sino cerca de la llegada del lote ordenado. Recuerde que existe incertidumbre tanto en la demanda como en el tiempo de entrega. Así, se considerarán los valores esperados. Sea

D_x = valor esperado de la demanda en el tiempo de entrega

Se verá el caso de tasa de reabastecimiento infinita (EOQ). En el modelo determinístico, el punto de reorden R es igual a la demanda del tiempo de entrega D_x. De manera similar, para el modelo estocástico se establece $R = D_x$. La figura 6-17 muestra los casos posibles.

Los tres casos tienen el mismo punto de reorden. Debido a la naturaleza estocástica del ambiente, la *emisión* de la orden ocurre en el mismo nivel del inventario, pero su tiempo de llegada varía. La orden llega cuando todavía hay inventario disponible en el caso *a).* En el caso *b),* la orden llega justo cuando se agota el inventario. Por último, en el caso *c),* se tienen faltantes y por un tiempo el inventario no cumple su misión; mantener un inventario más alto previene los faltantes en el caso *c).* Para tener más inventario disponible, se establece el punto de reorden en

$$R = D_x + s$$

donde s es el inventario de seguridad. La diferencia entre el modelo determinístico del EOQ y el modelo estocástico estriba en el cálculo del punto de reorden, que incluye el inventario de seguridad.

D_x es una variable incontrolable, de manera que básicamente una decisión sobre R, la decisión de tiempo, es una decisión sobre el nivel del inventario de seguridad s. El valor de s determina el trueque entre el servicio y la inversión. Existen dos enfoques para encontrar el valor de s: uno de optimización que usa un costo por faltantes n, y otro administrativo, en el que se establece la política del nivel de servicio. Antes de investigar estos aspectos, se examina el método para evaluar D_x.

Demanda en el tiempo de entrega. Recuerde que tanto la demanda durante el tiempo de entrega como el tiempo de entrega mismo son no determinísticos. Para simplificar los desarrollos, inicialmente se supone que el tiempo de entrega es determinístico. Esto da mty buena aproximación al valor esperado en el caso estocástico. La demanda es una variable aleatoria, por lo general, dada para cierto periodo —semana, mes o año—. Es común que el valor de la demanda se obtenga mediante un método de pronósticos (capítulo 4). Se supone que la demanda es una variable aleatoria continua con función de densidad de probabilidad *f(D)y* función de distribución acumulada *F(D).* Sea

$\overline{D}$ = valor esperado (o media) de la distribución de la demanda en un periodo
σ = desviación estándar de la distribución de la demanda
r = tiempo de entrega, igual que en el caso determinístico

El periodo para el que se da la demanda puede ser distinto del tiempo de entrega. Por ejemplo, la demanda puede estar dada para una semana, mientras que el tiempo de entrega es cuatro semanas. Entonces se ajusta la demanda pronosticada a la longitud del tiempo de entrega. Se supone que las demandas para cada periodo son variables aleatorias independientes. Por lo tanto, la distribución de la demanda en el tiempo de entrega tiene los siguientes parámetros:

$$\text{Valor esperado (media)} = \overline{D_r}$$
$$\sigma^2_r = \sigma^2 r$$

donde a^2 es la variancia de la demanda en el tiempo de entrega, a^2 es la variancia de Z|) y x está dado en las mismas unidades de tiempo que *D* (días, semanas, etc.). Se obtiene

$\sigma_\tau = \sigma\sqrt{\tau}$ desviación estándar de la demanda en el tiempo de entrega

$$D_r = Dr$$

Ejemplo 6-19. Demanda en el tiempo de entrega. La demanda anual de azúcar de un fabricante local de refrescos tiene distribución normal con *D* = 800 tons y o = 25 tons. El tiempo *qe* entrega del azúcar es 5 días hábiles. Se supone que hay 250 días hábiles en un año. *Solución.* La demanda en el tiempo de entrega también tiene distribución normal con

$$\overline{D}_\tau = \overline{D}\tau = (800)\left(\frac{5}{250}\right) = 16$$
$$\sigma^2_\tau = \sigma^2\tau = (25)^2\left(\frac{5}{250}\right) = 12.5$$

En la realidad, no sólo la demanda puede variar, sino también el tiempo de entrega. Éste puede ser el caso en el que la fuente de abastecimiento no es confiable —por huelgas, plima, etcétera—. Por lo tanto, se tienen que ajustar las ecuaciones para tomar en cuenta la variabilidad en el tiempo de entrega. El caso general es muy complejo, así que se harán dos suposiciones para simplificarlo: los tiempos de entrega sucesivos son variables aleatorias independientes (una suposición similar a la demanda variable) y las órdenes no se cruzan; las órdenes se reciben en la secuencia en que se emitieron. Este fenómeno puede ocurrir si los tiempos de entrega varían. Para un solo proveedor es poco probable que se crucen las órdenes.

Con estas dos suposiciones simultáneas, es sencillo incorporar al análisis la variabilidad del tiempo de entrega. Suponga que el tiempo de entrega tiene una distribución de probabilidad con media μ_L y variancia σ^2_L. Se sabe también que la demanda en el tiempo de entrega es una variable aleatoria con media $\overline{D}_r = \overline{D}r$ y variancia $\sigma^2_r = \sigma^2 r$. Hadley y Whitin (1963, p. 153) demuestran que en este caso, considerando variabilidad en el tiempo de entrega, la media y la variancia de la demanda en el tiempo de entrega toman los siguientes valores:

$$\overline{D}_\tau = \overline{D}\mu_L$$

$$\sigma^2_\tau = \mu_L\sigma^2 + \overline{D}^2\sigma^2_L$$

Vale la pena comentar que cuando en la práctica se ajusta una distribución a D_r y no se hace el ajuste a D y r por separado y después se convoluciona, entonces no importa si r es o no una variable aleatoria.

Ejemplo 6-20. Se considera de nuevo el fabricante de refrescos del ejemplo 6-19. Suponga que el tiempo de entrega ya no es constante, sino que varía con media 5 y desviación estándar 1.

Solución. Se observa que

$$\overline{D} = 800 \text{ unidades anuales} \qquad \sigma = 25 \qquad \mu_L = \frac{5}{250} \qquad \sigma_L = \frac{1}{250}$$

La demanda durante el tiempo de entrega tiene las siguientes media y variancia:

$$\overline{D}_\tau = \overline{D}\mu_L = 800\left(\frac{5}{250}\right) = 16$$

$$\sigma^2_\tau = \left(\frac{5}{250}\right)(25)^2 + (800)^2\left(\frac{1}{250}\right)^2 = 22.74$$

Observe que debido a la variabilidad en el tiempo de entrega, la variancia de la demanda en ese tiempo tuvo un aumento sustancial.

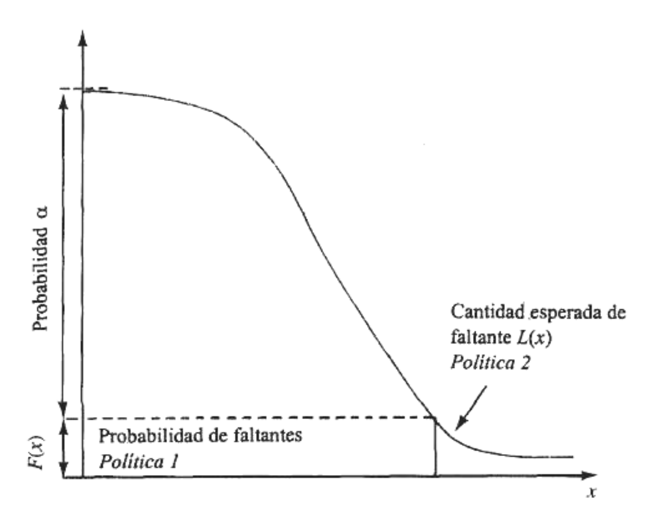


FIGURA 6-18 Probabilidad acumulada de la demanda

Existen dos políticas de nivel de servicio primordiales, ambas relacionadas con las probabilidades de faltantes. La figura 6-18 ayudará a definirlas. Se muestra *F (x)* como la distribución *acumulada* de una variable aleatoria *x.* La función de dens dad de probabilidad de *x* es /(*). Para cualquier valor dado de *x,* la altura de la curva *F(x)* es la probabilidad de que la siguiente observación exceda a *x,* es decir, caiga en el intervalo *[x,* ∞]. Las dos políticas que se muestran en la gráfica son las siguientes:

Política 1: Esta política especifica la probabilidad de no quedarse sin inventario durante el tiempo de entrega, esto es, en ningún ciclo del inventario. Con frecuencia se llama "rivel de servicio de ciclo". En la figura 6-18 esta probabilidad es igual a 1 - *F(x*),que se denotará por a. Otra manera de ver esta política es a través de la función de densidad de la demanda del tiempo de entrega D_r. Ésta se muestra en la figura 6-19, suponiendo que esta distribución es ¡normal con media $\overline{D}_r$. Esta figura ilustra la influencia de *s* sobre *R* y la probabilidad de faltares, a también puede verse como la proporción de ciclos en los que no ocurren faltantes. Esta (política es muy útil cuando el impacto de un faltante no depende del número de unidades que faltan.

Ejemplo 6-21. Política 1. De nuevo, considere al fabricante de refrescos del ejemplo 6-19. Suponga que guardan 5 tons como inventario de seguridad. ¿Cuál es el nivel de servicio obtenida?

Solución. Recuerde que

$$R = \overline{D}_\tau + s = \overline{D}\tau + s = 16 + 5 = 21$$

y

$$F(R) = \alpha$$

para encontrar $F(R)$ se evalúa la desviación estándar normal z:

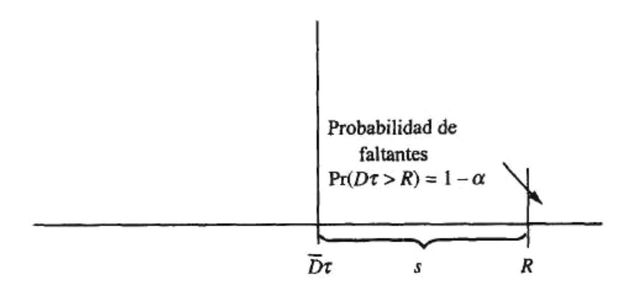
$$z = \frac{x-\mu}{\sigma} = \frac{R-\overline{D}\tau}{\sigma_\tau} = \frac{21-16}{3.54} = 1.41$$

De la tabla A-1,

$$F(z \leq 1.41) \approx 0.92$$

o sea, el nivel de servicio es cercano al 92%. En otras palabras, la probabilidad de un faltantje para cada ciclo de órdenes es 8%, o el 8% de los ciclos al año tendrán uno o más faltantes.

Política 2: En esta política se establece la porción preferida de la demanda anual (en unidades, órdenes de clientes o dólares) que se surte de manera instantánea del inventario. Con frecuencia se conoce como "tasa de surtido" y se denota por p. Esta medida determina la canti-



Política 1

dad de faltante esperada durante cada tiempo de entrega. La cantidad de faltante esperada está dada por el área sombreada de la figura 6-18, con un valor de $(1 - \beta)\overline{D}$. Esta área se evalúa tomado esperanzas parciales, denotadas por *L(x).* Se usa la misma idea que en el problema del voceador. Formalmente, para cualquier valor z de *x*,

$$L(z) = \int_z^{\infty}(x - z)\phi(x)\,dx$$

donde ø(*x*) es la función de densidad de *x*. *L(z)* se puede tabular para distintas distribuciones. La tabla A-2 en el apéndice da valores de esperanzas parciales para la distribución normal estándar, {*N*(0, 1)}, como una función de la variable normalizada *z*. Como *L(z)* se evalúa para σ = 1, para obtener la cantidad esperada de faltante durante el tiempo de entrega, se tiene que multiplicar por σ_r, es decir,

$$\sigma_\tau L(z)$$

Recuerde que CT_T es la desviación estándar de la demanda del tiempo de entrega. Como la política 2 se relaciona con la demanda anual, el número esperado de unidades faltantes por año está dado por

$$\sigma_\tau L(z)\left(\frac{\overline{D}}{Q}\right)$$

donde *Q* es la cantidad a ordenar, *D/Q* es el número esperado de ciclos de inventario por año y *D* es la demanda promedio anual. Usando la tasa de surtido (3, el número deseado de unidades faltantes por año es

$$(1 - \beta)\overline{D}$$

que se iguala con el valor anterior. Entonces, se obtiene

$$(1 - \beta)\overline{D} = \sigma_\tau L(z)\left(\frac{\overline{D}}{Q}\right)$$

o

$$L(z) = \frac{(1 - \beta)Q}{\sigma_\tau}$$

Ejemplo 6-22. Política 2. De regreso en el problema de los refrescos, se evalúa la tasa para un inventarío de seguridad de 5 tons. Se supone que la cantidad a ordenar es 20 tons.

Solución. Los datos básicos disponibles son

$$\begin{aligned} D &\sim N(800, 625) \\ \{N(\mu, \sigma^2)\}\tau &= 5/250 \text{ años} \\ D\tau &\sim N(16, 12.5) \\ Q &= 20 \text{ tons} \\ s &= 5 \text{ tons} \end{aligned}$$

Para encontrar β se evalúa $L(z)$.

$$\sigma_\tau = \sqrt{12.5} = 3.54$$

$$z = \frac{R - \overline{D}\tau}{\sigma_\tau} = \frac{21 - \left(800\frac{5}{250}\right)}{3.54} = 1.41$$

De la tabla A-2 en el apéndice,

$$L(1.41) = 0.0359$$

de manera que

$$L(z) = 0.0359 = \frac{(1-\beta)Q}{\sigma_\tau}$$

o

$$\frac{(1-\beta)20}{3.54} = 0.0359$$

El manejo algebraico da

$$\beta = 1 - \frac{(0.0359)3.54}{20} = 99.4\%$$

Éste es un valor bastante distinto del obtenido para la política 1. Este resultado pone de manifiesto el hecho de que las dos políticas miden distintos tipos de servicio.

El número esperado de unidades faltantes por año es

$$\sigma_\tau L(z)\frac{\overline{D}}{Q} = 3.54(0.0359)\frac{800}{20} = 5 \text{ tons}$$

Aun con un inventario de seguridad de 5 tons, el faltante esperado es 5 tons de azúcar al año.

Ahora se calcula el inventario de seguridad s para cada política, basado en $\alpha = \beta = 0.95$.

Política 1: De la tabla A-1 en el apéndice,

$$F(z) = 0.95 \Rightarrow z = 1.65$$

y

$$z = \frac{R - \overline{D}\tau}{\sigma_\tau} = \frac{\overline{D}\tau + s - \overline{D}\tau}{\sigma_\tau} = \frac{s}{\sigma_\tau}$$

Entonces

$$s = z\sigma_\tau = (1.65)(3.54) = 5.84 \approx 6$$

Política 2: Recuerde que

$$L(z) = \frac{(1-\beta)Q}{\sigma_\tau} = \frac{0.05 \times 20}{3.54} = 0.282$$

y de la tabla de $L(z)$,

$$L(0.26) = 0.282, \qquad \text{de manera que } z = 0.26$$

Esto implica que

$$s = z\sigma_\tau = (0.26)(3.54) = 0.92 \approx 1$$

Observe que s es mucho menor que la s determinada para la política 1.

Se hace hincapié en que las dos políticas son completamente diferentes; la política 1 da la proporción de ciclos anuales en los que no ocurren faltantes, sin importar la magnitud del fal-

tante, y la política 2 da la proporción de la demanda anual satisfecha con el inventario, sin relacionarla con el número de ciclos con faltantes. En la industria, la tasa de surtido es más común que la política 1.

3.2.3 Modelo (Q, *R)*

Ahora se considerará el modelo estocástico esencial para el sistema de revisión continua. Se presenta un enfoque administrativo, en el cual se establece una política de servicio, y un enfoque de optimización, que es la versión estocástica del EOQ deterministico. Recuerde que en el caso de revisión continua (sección 1.5) i? es una variable de decisión, al contrario del caso deterministico, en el que *R* se obtuvo a partir de la demanda en el tiempo de entrega. Las dos variables de decisión *Q y R,* definen la política para este modelo.

Enfoque administrativo: decisión de cantidad. Se evalúa la cantidad a ordenar usando el modelo EOQ, sustituyendo el valor esperado de la demanda aleatoria por la de la demanda conocida:

$$Q = \sqrt{\frac{2A\overline{D}}{h}}$$

Este valor no es el valor de *Q* que se usa en el enfoque de optimización.

Enfoque administrativo: decisión de punto de reorden. El punto de reorden está dado por

$$R = \overline{D}\tau + s$$

de forma que el inventario de seguridad determina a *R*. El inventario de seguridad maneja la variabilidad de la demanda durante el tiempo de entrega, que se mide por σ_r. Por lo tanto, el inventario de seguridad se mide en "unidades de desviación estándar" y es

$$K\sigma_T$$

donde K es el factor de seguridad elegido para proporcionar el nivel de servicio deseado.

Si la demanda en el tiempo de entrega tiene distribución normal, se puede conocer mejor el valor de K. Considere la figura 6-19. Por la naturaleza de la distribución normal,

$$s = z\,\sigma_r$$

donde z es una variable normal estándar, y mide el número de desviaciones estándar a partir de la media. Observe que en este caso K = z. Para el resto de este análisis, se supondrá una distribución normal para la demanda en el tiempo de entrega; así,

$$R = \overline{D}_\tau + z\sigma_\tau = \overline{D}\tau + z\sigma_\tau$$

Esta estructura general para evaluaré es la misma para ambas políticas 1 y 2 de nivel de servicio. La diferencia está en el *valor asignado a z.*

Punto de reorden: política 1. El nivel de servicio requerido es a. El procedimiento es

1. En la tabla A-1, se encuentra el valor de z que corresponde a

$$F(z) = \alpha$$

2. Se evalúa *R* usando el valor obtenido de *z.*

Ejemplo 6-23. Punto de reorden: política 1. Se trabajará de nuevo en el ejemplo 6-21; pero se invierte el orden. Se desea encontrar *Ry s* para un nivel de servicio especificado de **a** = 0.95.

Solución. Recuerde que

$$D \sim TV\ (800, 625)$$

y

$$D_x \sim N\ (16{,}125)$$

Paso 1:

$$F(z) = 0.95$$

y de la tabla de la distribución normal (tabla A-1) se encuentra

$$z - = 1.65$$

Paso 2:

$$R = D_x + ZCT_T = 16+1.65x3.54 = 21.84$$

El inventario de seguridad más grande, 5 = 5.84 tons, proporciona un mejor nivel de servicio que *s* = 5 tons en el nivel de servicio de 92%.

Punto de reorden: política 2. El nivel de servicio requerido es β (tasa de surtido). El pro cedimiento es

1. Se evalúa

$$L(z) = \frac{(1-\beta)Q}{\sigma_\tau}$$

2. En la tabla A-2 se usa *L{z)*para obtener z.
3. Se evalúa *R* usando el valor de *z.*

Ejemplo 6-24. Punto de reorden: política 2. De nuevo se trabaja con el ejemplo 6-22J calculando los valores de *Q* y *s* en lugar de asignarles valores arbitrarios.

Solución. Otra vez se observa que

$$D \sim N(800, 625)$$
$$D_\tau \sim N(16, 12.5)$$

Suponga que se requiere una tasa de surtido de $\beta = 95\%$ y que

$$A = \$50$$
$$c = \$4000 \text{ por ton}$$
$$i = 20\%$$
$$h = 800$$

Entonces

$$Q = \sqrt{\frac{2A\bar{D}}{h}} = \sqrt{\frac{2 \times 50 \times 800}{800}} = 10 \text{ tons}$$

Paso 1:

$$L(z) = \frac{(1-\beta)Q}{\sigma_\tau} = \frac{(1-0.95)10}{3.54} = 0.14$$

Paso 2: De la tabla A-2 en el apéndice,

$$z = 0.71$$

Paso 3:

$$R = \overline{D}_\tau + z\sigma_\tau = 16 + 0.71 \times 3.54 = 18.51$$

Entonces $s = 2.51$ tons, $Q = 10$ tons y $\beta = 95\%$ comparado con los valores arbitrarios de $s = 5$ y $= 21$, lo que da $\beta = 99.4\%$.

Un faltante puede ocurrir sin importar qué nivel de servicio se elija. Si es así, se paga una sanción por faltantes implícita en el nivel de servicio elegido. Para evaluar el costo por faltantes implícito se analiza el modelo *(Q, R)* usando el enfoque de análisis marginal usado para el problema del voceador. En un ciclo de inventario, es económico mantener una unidad adicional en el inventario de seguridad, siempre y cuando su costo de mantenerla no sea mayor que el costo esperado por faltantes para un faltante de una unidad. Si se examina la figura 6-19,la probabilidad general de un faltante es F(z), donde [1 - *F(z)]* = a es un valor seleccionado específico. Utilizando una notación familiar, sea *h* el costo anual de mantener una unidad, *n* el costo por unidad que falta y *D/Q* el número de ciclos de inventario por año. Entonces, *por ciclo,* el balanceo de los costos de mantener y por faltantes da

$$\frac{h}{\left(\frac{\overline{D}}{Q}\right)} = [1 - F(z)]\pi$$

o, después de manipulación algebraica,

$$\pi = \frac{hQ}{[1 - F(z)]\overline{D}}$$

El costo implícito por faltante es una manera útil de que la administración juzgue si una elección de un nivel de servicio en particular es apropiada. La ecuación paran: se cumple para ambas políticas de nivel de servicio. De nuevo, la diferencia está en la evaluación del valor adecuado de *z.* En el siguiente ejemplo se muestra lo anterior.

Ejemplo 6-25. Costo implícito por faltantes. Se calcula el costo implícito por faltantes para el fabricante de refrescos de los ejemplos anteriores.

Solución. Recuerde:

$$A = \$50$$
$$i = 20\%$$
$$c = \$4000$$
$$h = 800$$
$$D = N(800, 625)$$
$$Q = 10$$
$$D_\tau = N(16, 12.5)$$

Política 1:

$$\alpha = 95\% \quad \text{y} \quad F(z) = 0.95$$

$$\pi = \frac{hQ}{[1 - F(z)]\overline{D}} = \frac{800 \times 10}{[1 - 0.95]800} = \$20 \text{ por ton que falta}$$

Política 2:

$$\beta = 95\% \quad \text{y} \quad L(z) = 0.14$$

De la tabla A-2 en el apéndice,

$$z = 0.71$$

De la tabla de la distribución normal (tabla A-1), para $z = 0.71$,

$$F(z) = 0.7611$$

$$\pi = \frac{hQ}{[1 - F(z)]\overline{D}} = \frac{800 \times 10}{(1 - 0.7611)800} = \$41.85 \text{ por ton que falta}$$

¿Por qué π es distinta para las políticas 1 y 2?

Curva de intercambio de nivel de servicio. Una curva de intercambio, por su naturaleza, muestra un *trueque* entre dos entidades de interés. En este caso, concierne el trueque ejitre la inversión en un inventario de seguridad y el faltante. Se estudiará este enfoque para un solo artículo; pero se puede extender a artículos múltiples.

Considere la política 2 —tasa de surtido—. Para cada valor de (3 se pueden caljcular dos medidas. Éstas son

El número esperado de unidades faltantes por año es igual a

$$(1 - \beta)\overline{D}$$

- La inversión en inventario de seguridad es

$$Cz\sigma_r$$

Cada valor de β genera un valor diferente de *z*. La curva de intercambio obtenido se muestra en la figura 6-20. Conforme la tasa de surtido aumenta, la inversión en inventario kie seguridad aumenta y el número de unidades faltantes disminuye. Ésta es una buena manera de evaluar las implicaciones de un nivel de servicio establecido. Se puede generar una curva de intercambio similar para la política 1.

Ejemplo 6-26. Curva de intercambio de nivel de servicio. Se desarrolla una curva de intercambio para la política 2 para el fabricante de refrescos.

Solución. Recuerde que

$$D_x \sim N(16{,}12.5)$$

$$D \sim N(800{,}625)$$

$$c = \$4000 \text{ por ton}$$

$$Q = 10 \text{ tons}$$

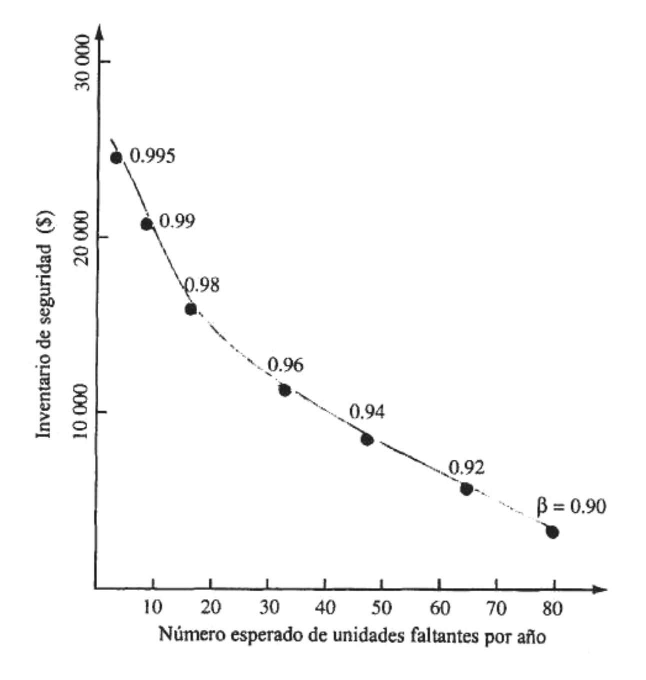


FIGURA 6-20
Curva de intercambio para la política 2

$$L(z) = \frac{(1-\beta)Q}{\sigma_\tau} = \frac{(1-\beta)10}{3.54} = 2.824(1-\beta)$$

La tabla 6-13 contiene los datos para generar la curva de intercambio dada en la figura 6-20. Ahora se desarrolla una curva de intercambio para la política 1; recuerde que el número de ciclos con faltantes es

$$(1-\alpha)\frac{\overline{D}}{Q} = (1-\alpha)\frac{800}{10} = 80(1-\alpha)$$

Los datos para la curva de intercambio están dados en la tabla 6-14; la gráfica de estos datos se muestra en la figura 6-21. De nuevo observe que el inventario de seguridad para la política 1 normalmente es más alto que el de la política 2.

TABLA 6-13
Datos de intercambio para la política 2

(3 tasa de surtido	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	0.99	0.995
(1 - P)Z), número de unidades faltantes	80	64	48	32	16	8	4
L(z), esperanza parcial	0.282	0.225	0.169	0.113	0.056	0.028	0.014
z, variable normalizada	0.26	0.41	0.60	0.83	1.20	1.51	1.80
cza_x, costo del inventario de seguridad ($)	3682	5806	8496	11 753	16 992	21 382	25 488

TABLA 6-14
Datos de intercambio para la política 1

α, tasa de surtido	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	0.99	0.995
z, variable normalizada	1.29	1.41	1.56	1.76	2.06	2.33	2.57
$D(1-\alpha)/Q$, número de ciclos con faltantes	8	6.4	4.8	3.2	1.6	0.8	0.4
$cz\sigma_\tau$, inventario de seguridad ($)	18 266	19 966	22 090	24 921	29 169	32 993	36 391

El enfoque de optimización. El enfoque de optimización encuentra un valor óptimo para las dos variables de decisión (£>*, i?*)que minimiza el costo total anual esperado. El valor ssperft-do se usa debido a la naturaleza aleatoria de la demanda. Como antes, las componentes de costo son costo de compra, costo de ordenar, costo de mantener inventario y costo por faltanies. Primero se desarrollan estos costos por ciclo de inventario y después se transforman a costo anual. La geometría del inventario se muestra en la figura 6-22. Los valores de las componentes de costo por ciclo son

El costo de compra es igual a cQ, donde c es el costo unitario.
El costo de ordenar es igual a A.
El costo del inventario promedio es igual a hl, donde h es el costo de mantener el inventa rio por unidad por unidad de tiempo.

En promedio, el nivel del inventario fluctúa entre $s + Q$ y s, por lo cual una aproximación al inventario promedio es

$$\bar{I} = \frac{1}{2}(s + Q + s) = \frac{Q}{2} + s$$

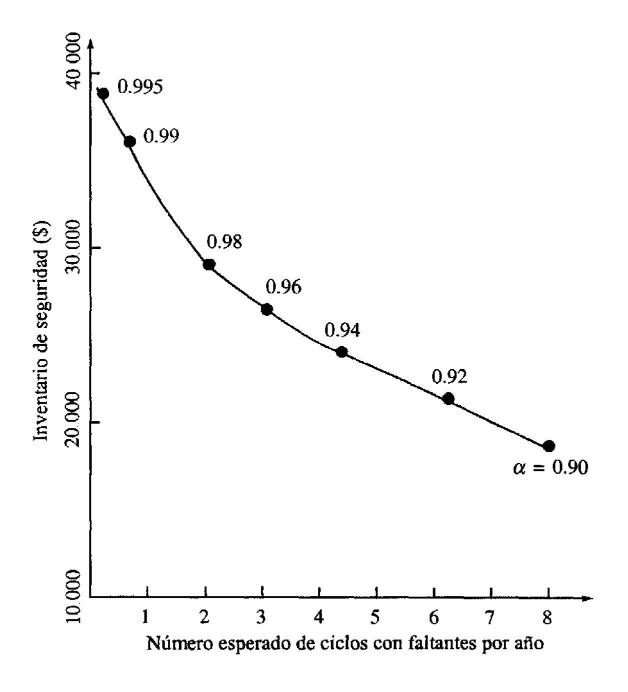


FIGURA 6-21
Curva de intercambio para la política 1

$$= \frac{Q}{2} + (R - \bar{D}\tau)$$

La longitud de ciclo esperada es

$$T = \frac{Q}{\bar{D}}$$

y el costo esperado de mantener el inventario por ciclo es

$$h\frac{Q}{\bar{D}}\left(\frac{Q}{2} + R - \bar{D}\tau\right)$$

El costo por faltantes es una función del número esperado de faltantes. Los faltantes ocurren siempre que la demanda durante el tiempo de entrega exceda el valor de *R*. Por lo tanto, el nú mero esperado de unidades que faltan está dado por la esperanza parcial. *283*

$$\bar{b}(R) = \int_R^\infty (D - R)f(D)dD$$

b(R)es la distribución de los faltantes como una función de *R*, *b(R)* es el valor esperado y *D*, *f(D)* se definieron antes. Si *D* tiene distribución normal, entonces

$$\bar{b}(R) = \sigma_\tau L(z)$$

El costo por faltantes por ciclo es

$$\pi\bar{b}(R)$$

donde π es la sanción por unidad que falta.

El costo esperado por ciclo está dado por

$$A + cQ + h\frac{Q}{\bar{D}}\left(\frac{Q}{2} + R - \bar{D}\tau\right) + \pi\bar{b}(R)$$

El número esperado de ciclos por año es *D/Q*, y multiplicando el costo del ciclo por este valor se obtiene el costo anual esperado *K(Q, R)*.

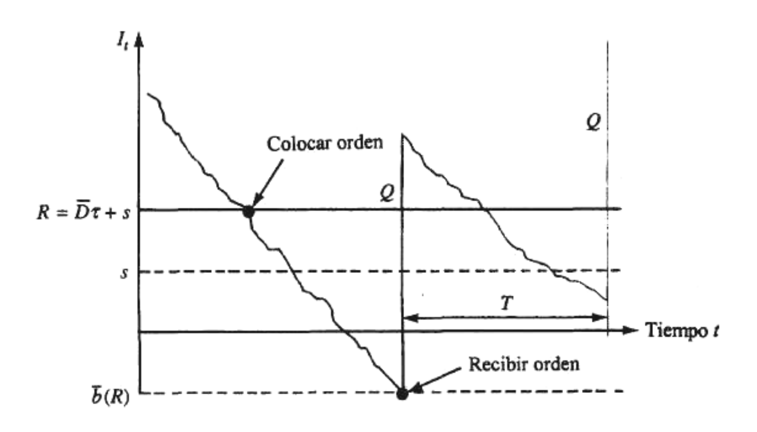


FIGURA 6-22
Geometría del modelo (Q, R)

$$K(Q, R) = \frac{A\overline{D}}{Q} + c\overline{D} + h\left(\frac{Q}{2} + R - \overline{D}\tau\right) + \frac{\pi \overline{D}\overline{b}(R)}{Q}$$

Para obtener el mínimo, se establece

$$\frac{\partial K}{\partial Q} = \frac{\partial K}{\partial R} = 0$$

Ahora

$$\frac{\partial K}{\partial R} = h + \frac{\pi \overline{D}}{Q}\left(\frac{\partial \overline{b}(R)}{\partial R}\right)$$

Primero se encuentra la derivada parcial del término de órdenes atrasadas.

$$\begin{aligned}\frac{\partial \overline{b}(R)}{\partial R} &= \frac{\partial}{\partial R}\int_R^\infty (D - R) f(D)\, dD \\ &= -\int_R^\infty D f(D)\, dD \\ &= -[1 - F(R)]\end{aligned}$$

Éste es el resultado de la regla de Leibnitz para derivar integrales.

Ahora, al sustituir este resultado en la derivada parcial respecto a R, se obtiene

$$\frac{\partial K}{\partial R} = h + \frac{\pi \overline{D}}{Q}\{-(1 - F(R)\} = 0$$

Arreglando los términos se tiene

$$1 - F(R^*) = \frac{hQ}{\pi \overline{D}}$$

Ahora se toma la derivada respecto a Q y se iguala a cero:

$$\frac{\partial K}{\partial Q} = -\frac{A\overline{D}}{Q^2} + \frac{h}{2} - \frac{\pi \overline{D}\overline{b}(R)}{Q^2} = 0$$

Despejando Q se obtiene

$$Q^* = \sqrt{\frac{2\overline{D}[A + \pi \overline{b}(R)}{h}}$$

Para encontrar R^* se necesita Q^* y para encontrar Q^* se necesita i?*.Por fortuna, se puede usar un procedimiento iterativo para encontrarlos. Este procedimiento es

0. Se hace $j = 0$.
1. Se supone que $b(R) = 0$. Se despejan Q^* y Qj de esta ecuación.
2. Se utiliza Qj para encontrar Rj.
3. Se evalúa $b(Rj)$.

4. Se usa $\bar{b}(R_j)$ para encontrar un nuevo valor de Q, digamos Q_{j+1}.
5. Q_{j+1} se usa para encontrar R_{j+1}.
6. Si Q_{j+1} se parece a Q_j o R_{j+1} se parece a R_j, el procedimiento se detiene. De otra manera, se hace $j = j + 1$ y se regresa al paso 3.

Por lo general, hay que realizar dos o tres iteraciones para obtener la solución óptima.

Ejemplo 6-27. Modelo *(Q,R):* enfoque de optimización. Super-P es una compañía procesadora de cacahuates. La experiencia indica que la demanda anual tiene distribución normal con D = 25 000 tons y la desviación estándar de 36 tons. Para ordenar los cacahuates, la compañía gasta $50 para procesar la orden. Cada tonelada de cacahuates cuesta $ 1000 y la tasa de interés anual para evaluar el costo del inventario es 25%. La sanción por un faltante se estima en $4 por ton. El tiempo para colocar una orden es aproximadamente una semana. Calcule la cantidad económica a ordenar y el punto de reorden usando el enfoque de optimización.

Solución.

A = $50 i = 25%
anual
c = $1000 por ton ->. h = $250 por ton por año D
~ $N(25\ 000, 1296)$ TI = $4 por ton x = 1 semana
= 1/52 años

Es sencillo calcular los parámetros de la distribución del tiempo de entrega:

$$\bar{D}_\tau = 25\,000/52 \approx 481$$

$$\sigma_\tau^2 = 1296/52 \approx 25$$

entonces

$$D_\tau \sim N(481,\ 25.00)$$

Se sigue el procedimiento establecido:

Paso 0: Se hace $j = 0$.

Paso 1: Se supone que $\bar{b}(R) = 0$ y se calcula la cantidad a ordenar inicial:

$$Q_0 = \sqrt{\frac{2A\bar{D}}{h}} = \sqrt{\frac{(2)(50)(25\,000)}{(250)}} = 100$$

Paso 2: Se encuentra la R_0 correspondiente usando la distribución normal estándar para encontrar $F(z)$ y $R_0 = \bar{D}_\tau + z\sigma_\tau$.

$$1 - F(z) = \frac{hQ}{\pi\bar{D}} = \frac{(250)(100)}{(4)(25\,000)} = 0.25$$

Entonces $F(z) = 0.75$. De la tabla A-1 en el apéndice, se obtiene $z = 0.67$ y

$$R_0 = 481 + (0.67)(5) = 484.4 \approx 484$$

Paso 3: Se calcula el nivel máximo de órdenes atrasadas, de la tabla, $L(0.67) = 0.1503$.

$$\bar{b}(R_0) = \sigma_\tau L(z) = (5)(0.1503) = 0.75$$

Paso 4: Se calcula la nueva cantidad a ordenar:

$$Q_1 = \sqrt{\frac{2\bar{D}(A + \pi\bar{b}(R_0))}{h}} = \sqrt{\frac{(2)(25\,000)(50 + (40)(0.75))}{250}} \approx 126$$

Paso 5: Se usa Q_1 para encontrar R_1.

$$1 - F(z) = \frac{(250)(126)}{(4)(25\,000)} = 0.315$$

Se tiene que $F(z) = 0.685$, $z = 0.48$ y $L(z) = 0.204$. Entonces

$$R_1 = 481 + (0.48)(5) \approx 484$$

Paso 6: $Q_1 = 126 \neq Q_0 = 100$; pero $R_1 = 484 = R_0 = 484$. El procedimiento se detiene con $Q^* = 126$ y $R^* = 484$.

3.2.4 Otros modelos

Se concluye el tema de sistemas de revisión continua con dos variantes de los modelos ¡anteriores: sistema de inventario base y sistema de dos contenedores. La implantación de ambos es sencilla y se usa ampliamente en la industria.

Sistema de inventario base. Un sistema de inventario base es un caso especial de unj modelo *(Q, R*). En la forma más sencilla, al hacer cualquier retiro del inventario, se emite una orden de reabastecimiento por la misma cantidad. Sólo se requiere una variable de decisión, el punto de reorden *R*, que es igual a la demanda esperada en el tiempo de entrega más el inventar: o de seguridad. La cantidad a ordenar se planea para que eleve el inventario a *R*, por lo que *R* es el inventario meta. Así, *siR* = 100 y se sacan 15 unidades juntas del inventario, la cantidad a ordenar será 15, para elevarlo de nuevo a 100. La posición del inventario (disponible más ordenado) es siempre igual a i? y se llama *nivel del inventario base.* El nivel del inventario base es la posición más baja del inventario necesaria para mantener un nivel de servicio dado. Los sistemas ele inventario base tienen los niveles más bajos de inventario, pero el número de órdenes es alta. Este sistema se usa cuando las órdenes son poco frecuentes y los artículos son costosos. En?re los ejemplos se cuentan motores de repuesto para aviones, equipo pesado y muebles. El sistema de inventario base se conoce también como el sistema "vende uno, compra uno".

.•SiSiemrti de dos contenedores. Un sistema de dos contenedores es un caso especial del sistema de revisión continua. Su mayor ventaja consiste en que no es necesario mantener registros. Normalmente, el inventario se almacena en dos contenedores; los retiros del inventario se hacen del primer contenedor, que contiene *Q* — EOQ unidades. Una vez que está vacío, se emite una orden de EOQ unidades, y se usa el segundo contenedor como repuesto hasta que llega la orden. Así, el segundo contenedor tiene inventario suficiente para cubrir la demanda durante el tiempo de entrega más el inventario de seguridad, es decir, su contenido es igual *R.*Cuando llegan las nuevas órdenes, primero se llena el segundo contenedor para restablecerlo a su nivel original y el resto de la orden se coloca en el primer contenedor. El sistema de dos conté nedores es muy adecuado para casos de artículos de bajo valor y de uso casi continuo, como tuercas, tornillos y artículos de consumo.

SECCIÓN 3.2 EJERCICIOS

6.56. Para cierta compañía, suponga que el punto de reorden es 200, el inventario disponible es 80 y el inventario en la tubería es 150. ¿Debe colocarse una orden si se usa la política de revisión conti nua? ¿Qué pasaría con un inventario de 100 en la tubería?

6.57. Para el ejercicio 6.15, encuentre *R*, y dibuje la geometría del inventario para los siguientes valores de tiempos de entrega:

x = 1, 3, 6 meses

6.58. Para el ejercicio 6.21, suponga que Bike produce los manubrios y que se permiten faltantes. En cuentre *R* y dibuje la geometría del inventario, suponiendo $\tau = 6$ semanas.

6.59. Una parte del proceso de manufactura en la industria textil es corte y teñido. Ahí es donde se esta blecen las características técnicas y el color de la tela.

Una planta de corte y teñido usa un sistema de revisión continua *(Q,R)* para administrar su inventario de colores para teñir. El costo de ordenar es $200 y un galón de color púrpura cuesta $5.00. El costo anual de mantener el inventario se estima en 20%. La demanda esperada anual es de 10 000 galones y la demanda en el tiempo de entrega tiene una distribución normal con #(400,900) $(=N(n,a^2))$.

a) Encuentre el tiempo de entrega τ.
b) Encuentre el punto de reorden para un nivel de servicio en el ciclo de 90% y el inventario de seguridad correspondiente.
c) Debido a la conveniencia de la entrega, *Q* se establece en 1000 galones. Encuentre *R* para el costo mínimo esperado si el costo por faltantes se estima en $4.00 por galón.

6.60. En el ejercicio 6.59, suponga que *R* = 400 galones.

a) Encuentre *Q**.
b) ¿Cuál es el costo anual adicional por faltantes?
c) Encuentre el porcentaje de tiempo que el inventario estará agotado.

6.61. Un distribuidor vende abrelatas eléctricos. La demanda es 6000 unidades anuales y es aproxima damente constante todo el año. Estos abrelatas cuestan $20 cada uno y la tasa anual de mantener inventario es 30%. Colocar una orden cuesta $150. Todos los faltantes se surten atrasados con un costo de una sola vez de $50 por unidad. Históricamente, la demanda durante el tiempo de entrega se distribuye uniformemente entre 100 y 200 unidades. Como el distribuidor usa un sistema de có digo de barras, piensa que sería mejor un modelo *(Q, R)* para controlar el inventario y las órdenes de los aparatos.

a) ¿Qué valor de *Q y R* recomendaría?
b) Encuentre el costo total asociado.

6.62. Super Sound vende equipos de sonido. La demanda histórica mensual de un reproductor de CD indica que tiene una distribución normal con media de 28 y desviación estándar de 8. Lleva alre dedor de tres meses que llegue un pedido, una vez colocada una orden. La tienda paga $60 por una unidad y cuesta $150 colocar la orden. La tasa de costo de mantener el inventario es de 30%. Su ponga que la cantidad que ordenan está basada en el EOQ estándar.

a) Qué valores de *(Q, R)* usarían si quisieran aplicar la política 1 con 90% del nivel de servicio?
b) ¿Qué tasa de surtido logra esta política?

6.63. Info Business Equipment (IBE) vende equipo de procesamiento de información. Un artículo, el HDO80 con disco duro de 800 MB, tiene una demanda mensual con distribución normal, cuyas media y desviación estándar son de 250 y 100, respectivamente. IBE compra la HDO80 en $360 y

la vende en $450. Colocar una orden tiene un costo de $209 y pasa un mes desde que coi oca la or den hasta que la recibe. Como la HDO80 es muy popular y difícil de conseguir, los clientes que quieren una esperarán lo que sea necesario para obtenerla. La tasa de costo de mantener invente rio que usa IBE es 20%.

a) Si el costo de papeleo de las órdenes atrasadas se estima en $5 por unidad, ¿qué polínica de in ventarios recomendaría?

b) El administrador está renuente a especificar un costo para las órdenes atrasadas porque siente que también se pierde una parte sustancial de la buena voluntad de los clientes. Está dispuesta a establecer que debe satisfacerse de inmediato al 98% de los clientes. ¿Cuál es su recomen dación ahora?

6.64. Repita el ejercicio 6.63 para una demanda con distribución exponencial con media de 2J50 unida des por mes.

6.65. En el ejercicio 6.63, encuentre el nivel de servicio que implican las políticas 1 y 2.

6.66. Para el ejercicio 6.16, suponga

x = 2 semanas o 4 semanas para una corrida de producción
T = 1 semana o 3 semanas para Hardware Electronics
T = 2 semanas o 5 semanas para Metstamp

a) Evalúe *R* para cada caso.

b) Evalúe *O,* en *R* para cada caso.

c) Dibuje la geometría del inventario para cada caso.

6.67. Gregg es el gerente de comercialización para Aerocon Company, que fábrica una línea de equipos de aire acondicionado. Existen alrededor de 20 modelos diferentes; sin embargo, más d ;170% de los subensambles son comunes a todos los modelos. Por lo tanto, la compañía opera en i n sistema de fabricación por pedido (FPP); esto es, ensamblan la parte final del producto sólo si tienen un pedido. Para acelerar el ensamble final almacenan los subensambles conjunes.

Gregg es responsable del inventario de subensambles y ha decidido administrarlo usandd un enfoque de revisión continua. La demanda semanal del subensamble de ventiladores tiene jiña distribución normal con *N* (500,2500).

Gregg sabe que su costo de ordenar es $300. El costo de producción de este suben sambli es $40.00 y el tiempo de entrega de producción es dos semanas. El costo de mantener el inventarié es 20% anual; los faltantes se surten tarde a un costo de $2.00 por unidad.

a) Encuentre el número promedio de subensambles de ventilador si el inventario d^be adrni- nistrarse bajo el enfoque administrativo.

b) Encuentre el nivel de servicio para las políticas 1 y 2.

6.68. En el problema 6.67, suponga que Aerocon redujo su tiempo de ensamble y ahora la íntrega se puede hacer en una semana. Sin embargo, el costo de ordenar se incrementó a $400. Qalcule de nuevo *á)* y *b)* y compare los resultados.

6.69. Aerocon, el fabricante de acondicionadores de aire, también tiene una línea de acondic ionadc|res centrales. Tiene un inventario de refacciones para dar servicio a este producto. Uno de e líos es¡ un subensamble para el compresor, que se compra a un proveedor externo. Tiene un tiempo de entre ga de seis semanas. El costo de este subensamble es $2000 y colocar la orden cuesta $100. La Re manda semanal es normal con iV(50,100). El costo de mantener el inventario se estima en 20% anual. La administración estableció una política de nivel de servicio, en el cual la probabilidad de un faltante no debe ser mayor que 0.005. Se usa un enfoque de revisión continua.

Interprete la política de servicio de la administración y encuentre *Q y R.* ¿Cuál es ;1 tamaño del inventario de seguridad y el costo implícito por faltantes?

6.70. Para el ejercicio 6.596), dibuje la curva de intercambio para las políticas 1 y 2 con P = 0.90. Com pare las dos políticas.

6.71. Para el ejercicio 6.62, dibuje la curva de intercambio para las políticas 1 y 2. Compárelas.

6.72. Para el ejercicio 6.63, dibuje la curva de intercambio para las políticas 1 y 2. Compárelas.

6.73. En el ejercicio 6.59 de la planta de corte y teñido, suponga que el tiempo de entrega es el calculado en el inciso *a)* y que el costo por faltantes es $4.00 por galón. Encuentre la cantidad económica a ordenar y el punto de reorden usando el enfoque de optimización.

6.74. En el problema 6.67 de Aerocon Company, Gregg decidió usar un enfoque de optimización. En cuentre el lote económico y el punto de reorden y compare con los resultados anteriores. ¿Cuál es el nivelde servicio que se obtiene para las políticas 1 y 2, suponiendo que el inventario de seguri dad es *b* (/?*)?

6.75. Evalúe en el problema 6.74 Q^*,R^* si la demanda semanal tiene una distribución uniforme con 300 $<D<$ 700. Compare y analice los resultados.

6.76. Para el caso de revisión continua, suponga que existe también un costo anual de mantener el in ventario que es proporcional al máximo inventario disponible. Determine Q * y R * tanto para el enfoque de nivel de servicio como para el de optimización.

6.77. Considere el sistema de revisión continua. Suponga que las órdenes pueden llegar en cajas y que cada caja contiene *n* unidades. Sólo es posible ordenar cajas completas. Encuentre Q * y R * para este caso. Trabaje un ejemplo.

6.78. Teks es una instalación de manufactura textil con varias plantas. En una de ellas fabrican telas a partir de fibras de algodón. El proceso de manufactura es un proceso de hilado hecho en telares. Una de las componentes del telar se llama peine, ya que los hilos van dirigidos por sus "dientes" hacia el área de hilado. Teks tiene más de 50 telares. Cuando un peine se desgasta, debe reempla zarse. Teks mantiene un inventario de peines que administra con un enfoque de inventario base.

La demanda mensual de los peines tiene una distribución normal con N (10, 9). El tiempo de entrega es constante de seis semanas. El costo de un peine es $3000 y un faltante crea un costo de $7000 por ciclo de inventario, debido a que la producción tiene que parar. El costo anual de mantener el inventario se estima en 20% y el costo de ordenar es de $200.

a) Encuentre el punto de reorden para un nivel de servicio de 95% en el ciclo.
b) ¿Cuál es el número promedio de peines en inventario? Suponga que se ordena una vez a la se mana.
c) ¿Cuál es el costo anual de la política? (Incluya los costos por faltantes.)

6.79. Suponga que Teks decide usar una política de órdenes urgentes para los peines en caso de faltantes, para evitar parar la producción. El artículo llegará a la planta en unas horas y se evitará el fal tante. Una orden urgente cuesta $800 por orden.

á) Encuentre el nivel de inventario deseado para este caso, y el costo anual. *b)* ¿Recomendaría usar esta política?

6.80. Para recapitular el concepto de inventario como una entidad de servicio, se da un resumen de va rios parámetros que pueden medir el servicio.

Número esperado de faltantes por ciclo
Número esperado de faltantes por año
Probabilidad de faltantes durante un ciclo
Fracción de tiempo que el sistema tiene el inventario agotado
Probabilidad de uno o más ciclos con faltantes durante un año
Fracción de la demanda que el inventario satisface de manera inmediata

a) Escriba o desarrolle un término matemático para cada uno.
b) Para un tiempo de entrega constante, en el que la demanda *esN(¡i,* a^2*)*, desarrolle una ex presión para cada uno.

6.81. En el ejercicio 6.80, suponga que la demanda del tiempo de entrega tiene; una distribución Poisspn con parámetro λ. Desarrolle una expresión para cada parámetro de servicio.

6.82. Un taller de servicio regional para un fabricante de televisores mantiene un inventario de circuitos de TV. El tiempo de entrega de la compra es tres semanas, tiempo durante el cual la demanda tiene una distribución normal con N (300,1600). Un circuito cuesta $90 y se vende en $150. El costo anual de mantener el inventario se toma como 25%. Los faltantes se surten tarde a un costo fijo de $6.00 por unidad. El taller usa el enfoque de inventario base para este artículo. Encuentre el punto de reorden y la política para ordenar. Desarrolle un modelo para el sistema de inventario base

6.83. cuando el tiempo de entrega de la compra es constante, la demanda durante este tiempo tiene distribución normal con $N(\mu, \sigma^2)$ y hay un costo por unidad que falta (π) y un costo por unidad que falta por unidad de tiempo *(π)*.

Haga las suposiciones necesarias. El distribuidor de abrelatas del ejercicio 6.61 decide ahorrar parte

6.84. del trabajo de un asiste: ite y manejar su propio inventario usando el sistema de dos contenedores.

a) Evalúe los parámetros requeridos.
b) Explique cómo se comportará el sistema.
c) Compare el costo promedio anual con el obtenido. ¿Qué recomendaría al distribuidor?

6.85. Suponga que el taller de servicio del ejercicio 6.82 usará el sistema de dos contenedores. Conteste las mismas preguntas que en el ejercicio 6.84,

3.3 Sistemas de revisión periódica

En la sección 1.5 se introdujo una política de revisión periódica. Aquí se abundará sobre la decisión de tiempo de esta política. El inventario se revisa cada T periodos. En cada revisión, si $X_t > R$,*no* se ordena, pero si $X_t < R$, se ordena hasta el nivel meta, S, donde X, es la posición del inventario. El comportamiento de este sistema se muestra en la figura 6-23.

En el primer punto de revisión no pasa nada. Después del periodo de revisión, 7\|el inventario (suponiendo que no hay artículos ordenados) se encuentra abajo del punto de; reor^en (punto 2), y se coloca una orden por Q = {5 - /,}. Esta orden llega T unidades más tarde (pukito 3) debido al tiempo de entrega.

Un caso especial de la política de revisión periódica es cuando $R = S$ y se coloca una or den en *cada* punto de revisión. La variable de decisión es el periodo de revisión T. Como eji el enfoque tomado para los sistemas de revisión continua, primero se estudia un modelo deterjminístico y después el modelo estocástico.

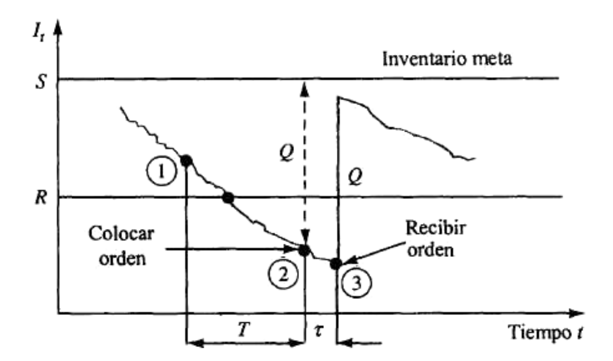


FIGURA 6-23
Sistema de revisión periódica

3.3.1 EOQ de nuevo

El modelo del EOQ también puede examinarse desde una perspectiva de revisión periódica. Recuerde que la suposición es que el tiempo de entrega es cero (sección 2.2.1). El EOQ se podría ver como un sistema de revisión periódica, en el que el valor óptimo del periodo de revisión es

$$T^* = \frac{Q^*}{D} = \sqrt{\frac{2A}{hD}}$$

El nivel de inventario meta es Q^*, de manera que el tamaño del lote ordenado es Q^*. Cuando el tiempo de entrega es x, T^* permanece igual, pero el inventario meta es $R + Q^*$ con tamaño de lote0*.

Ejemplo 6-28. Sistemas de revisión periódica. Se hace referencia al pequeño taller de soldadura en el ejemplo 6-1.

Solución. **Se tiene**

D = 1000 Ib/año Q^*
= EOQ = 1201b

Entonces

$$T^* = \frac{Q^*}{D} = \frac{120}{1000} = 0.12 \text{ años} = 6.24 \text{ semanas}$$

Seat = 2 semanas el tiempo de entrega; la demanda por semana es 1000/52 = 19.25 Ib/semana. Esto da un punto de reorden de

$R = Dx$ = 38.50 Ib La

geometría del inventario se muestra en la figura 6-24.

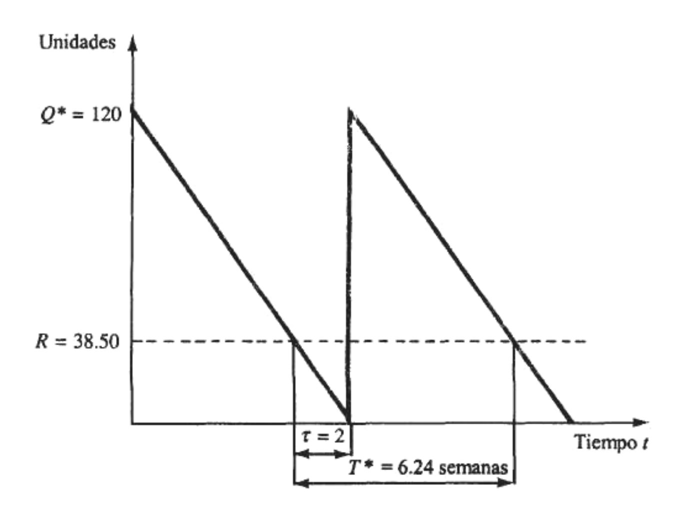


FIGURA 6-24
Geometría de revisión periódica

3.3.2 Modelos (S, T)

Considere un sistema de revisión periódica en el que el inventario meta es igual a *S*; en cada re visión si $X_t < S$, se ordena hasta el nivel del inventario meta *S*. Éste es un caso espejcial *ep* el que $R = S$. Se tienen dos variables de decisión, el intervalo de revisión *T* y el inventario metk *S*. Al igual que en los sistemas de revisión continua,todavía se tiene un *trueque* entre el nivel de servicio y la inversión. De nuevo hay dos enfoques, uno de optimizacion, basado en un costo por faltantesTi, y un enfoque administrativo, en el cual se fija el nivel de servicio. Se analizará el enfoque administrativo.

Se tienen las mismas suposiciones para los sistemas *(Q, R);* existe un reabastecinjiientd infinito, la demanda es una variable aleatoria*D*y el tiempo de entrega es constante e igi^al ax| La geometría del inventario se muestra en la figura 6-25.

Decisión del periodo de revisión. El periodo de revisión *T* se puede basar en la comjeniencia, es decir, una vez al mes, todos los viernes, etcétera, o según la fórmula EOQ, esto es,

$$T = \sqrt{\frac{2A}{h\overline{D}}}$$

Decisión fiel inventan») meta. El mismo argumento dado para el sistema *(Q, R)* se cunjiple aquí; elegir *S* es equivalente a decidir el nivel del inventario de seguridad. La diferencia está en la longitud del periodo para el que se necesita el inventario de seguridad. En el sistema *(Q, R)* se requería el inventario de seguridad para cubrir sólo el tiempo de enixega x,ya que tes órdenes se pueden colocar en cualquier momento. Para los sistemas *(S, T),* una orden debe ser lo Suficientemente grande para que dure hasta la siguiente revisión, *T*periodos después. Por lo tatito, *S* debe ser por lo menos igual a la demanda esperada durante *(T* + x), que no incluye invenijario de seguridad. Al considerar el inventario de seguridad y usar la misma notación que para el inodelo *(Q, R),* se obtiene

$$S = \overline{D}(T + \tau) + s$$

Para una demanda en el tiempo de entrega con distribución normal,

$$s = z\sigma_{T+\tau}$$

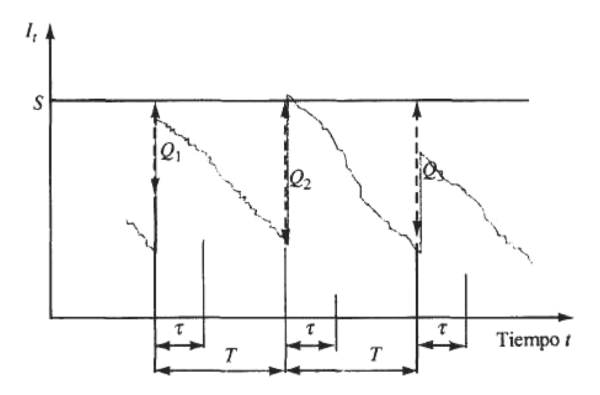


FIGURA 6-25
Geometría del sistema (*S*, *T*)

lo que lleva a

$$S = D(T+x) + za_{T+x}$$

donde $a_{T+\mathrm{T}}$ es la desviación estándar de la demanda durante *(T+ x).* Un sistema *(S, T)* requiere más inventario de seguridad que un sistema *(Q, R)* ya que el periodo que necesita protección contra faltantes es más largo.

El valor de z determina el nivel de servicio y, como antes, se puede usar cualquiera de las políticas 1 o 2.

Inventario meta, política 1: el nivel de servicio requerido es a,y el procedimiento es el mismo que para el sistema *(Q, R).*

1. En la tabla de la distribución normal (tabla A-1), se encuentra el valor de z que corresponde

$$F\{z) = a$$

2. Se evalúa *S* usando el valor obtenido para z.

Inventario meta, política 2: el nivel de servicio requerido es la tasa de surtido P. La cantidad esperada de faltantes durante *(T+x)* es

$$o_{T+T}L(z)$$

El número esperado de unidades faltantes en el año es

$$\frac{1}{\quad}$$

porque son \;*{T* + T) veces por año que se necesita protección contra faltantes. Éste es igual al número deseado de unidades que faltan al año obtenido por la tasa de surtido. Por lo tanto,

$$(1-\beta)\overline{D} = \frac{1}{(T+\tau)}\sigma_{T+\tau}L(z)$$

o, después de arreglar los términos,

$$L(z) = \frac{(1-\beta)\overline{D}(T+\tau)}{\sigma_{T+\tau}}$$

D(T + x) es la demanda esperada durante el periodo que se necesita protección contra faltantes. El procedimiento para la política 2 es

1. Se evalúa *L(z).*
2. Se usa *L(z)* en la tabla A-2 para obtener z.
3. Se calcula *S* usando el valor de z.

Ejemplo 6-29. Sistema (5, *T*). Jones, el dueño de una tienda de café, estima que la demanda anual de cierto tipo de grano de café tiene una ditribución normal con D = 240 Ib y a = 32. El tiempo de entrega de una orden es 1/2 mes. Jones adoptó una política de revisión periódica, (5, *T);* para controlar el inventario y estableció el ciclo de revisión *T* igual a un mes. Se quiere calcular el punto de reorden para las políticas 1 y 2. Las dos tienen nivel de servicio a = p = 95%.

Solución.

$$D \sim N(240, 1024)$$
$$T = 1 \text{ mes} = 1/12 \text{ años}$$
$$\tau = 1/2 \text{ mes} = 1/24 \text{ años}$$
$$T + \tau = 1/12 + 1/24 \text{ años} = 1/8 \text{ años}$$
$$\overline{D}_{T+\tau} = \overline{D}(T+\tau) = 240 \times \tfrac{1}{8} = 30$$
$$\sigma^2_{T+\tau} = \frac{1024}{8} \rightarrow \sigma_{T+\tau} = 11.31$$

Por lo tanto,

$$D_{T+\tau} \sim N(30, 128)$$

Política 1:

$$\alpha = 95\%$$
$$F(z) = 0.95$$

Entonces, de la tabla A-1,

$$z = 1.65$$

y $$S = \overline{D}_{T+\tau} + z\sigma_{T+\tau} = 30 + (1.65)(11.31) = 48.6$$

Política 2:

$$\beta = 95\%$$
$$L(z) = \frac{(1-\beta)\overline{D}_{T+\tau}}{\sigma_{T+\tau}} = \frac{(1-0.95)(30)}{11.31} = 0.1326$$

De la tabla A-2, se encuentra

$$z = 0.745$$

de manera que $$S = 30 + (0.745X11.31) = 38.42$$

De nuevo se obtiene el mismo nivel de servicio en distintos puntos de reorden para las dos políticas.

3.3.3 Sistemas de reabastecimtento opcional

Primero se analizó el sistema de revisión periódica y después el caso especial con *R* =} *S.* Al íora se examinará una modificación del caso general, el sistema de reabastecimiento opjcional, en ocasiones llamado de revisión opcional, minimax o sistema *(s, S).*[2] La modificación es que la prueba de reorden se hace usando el *inventario disponible* en lugar de la posición del inventario.

El sistema opera como sigue. Se definen dos niveles de inventario (s, *S).* El intervalo de revisión es *T* y en cualquier punto de revisión, la decisión es que si /, < *s,* se ordena $\$ - I_t$\ pero si /, > *s*, no se ordena. /, es el inventario disponible en cualquier punto de revisiónf La ventaja sobre los sistemas *(S,* T)es que la cantidad a ordenar pedida es razonable. Es particiulamjente útil cuando los costos tanto de revisión como de ordenar son significativos.

[2] Para este modelo se usa *s* como el punto de reorden en lugar del inventario de seguriclad por consistencia cpn la literatura existente.

Este sistema tiene tres variables de decisión, —*T*, *s* y *S*—. Se determina Tusando el método descrito antes. Encontrar los valores óptimos para *s* y *S* es bastante difícil. Se puede obtener una buena aproximación calculando una política *(Q, R)* y haciendo

$$s = R \qquad y$$
$$S = R + Q$$

El uso de la política *(s,* «S) es bastante común en la industria.

Ejemplo 6.30. Política *(s,S).* Considere la siguiente política *(s, S)* de revisión periódica del inventario, con *s* = 50, *S* = 150 y punto de revisión al final de cada mes. Las demandas mensuales en los últimos meses aparecen en la tabla 6-15. Suponiendo un inventario inicial de !23 unidades y tiempo de entrega de cero, se ilustra la política *(s, S).*

TABLA 6-15
Datos de demanda para el ejemplo 6-30

Mes	*t*	1	2	3	4	5	6	7	8
Demanda	*D*	30	54	50	62	55	50	66	30

Solución. La demanda del primer mes es 30 unidades y el inventario inicial es 123 unidades, entonces el inventario final para el primer mes es 93. Los cálculos se muestran en la tabla 6-16. Como 93 unidades es mayor que el punto de reorden 5 = 5 0 unidades, no se ordena. La demanda del segundo mes es 54 unidades, lo que da un inventario final de 39 unidades, éste es menor que el punto de reorden. Se coloca una orden de 111 (150 - 39) unidades, y el inventario se eleva a 150 unidades, el nivel del inventario meta. Los cálculos para los meses 3 al 8 se presentan en la tabla 6-16.

TABLA 6-16
Cálculos para la política *(s, S)*

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8
Inventario, inicio del mes	123	93	150	100	150	95	150	84
D	30	54	50	62	55	50	66	30
I_t	93	39	100	48	95	45	84	54
Q	0	111	0	102	0	105	0	0

SECCIÓN 3.3 EJERCICIOS

6.86. Para el ejercicio 6.29, evalúe el periodo de revisión óptimo. Establezca la política de revisión pe riódica. Evalúe *R* para una x de un mes. Dibuje la geometría del inventario.

6.87. Para el ejercicio 6.33, evalúe el periodo de revisión óptimo. Establezca la política de revisión pe riódica. Evalúe *R* para una x de cinco semanas. Dibuje la geometría del inventario.

6.88. Para el caso de Toys International del ejercicio 6.23, evalúe el periodo de revisión óptimo. Esta blezca la política de revisión periódica. Evalúe *R* para x = 21 días. Dibuje la geometría del inven tario.

6.89. Un distribuidor de medicamentos tiene una pastilla contra el dolor que se vende con receta y que viene en cajas de 100 pastillas. La demanda por contenedor en cualquier periodo de longitud / tie ne distribución normal con media 150/ y variancia 300/. Cada contenedor cuesta $20.00. El tiem-

po de entrega es cinco semanas y los faltantes se surten atrasados a un costo de pérdida tíe buefta voluntad de $15.00 por contenedor. El costo de la orden de compra es $100 y el costo i anual de mantener el inventario es 25%. Suponga que el inventario se revisa cada ocho semanas, Encuentre el inventario meta óptimo. *(Sugerencia:* convierta el costo por faltantes a nivel de servicijo.) ¿Cjiál es la probabilidad de faltantes? ¿Cuál es el costo esperado anual del inventario?

6.90. El distribuidor de medicamentos está considerando usar un sistema de: revisión continúa con los valores de Q y $R = S$ que se obtuvieron en el ejercicio 6.89. ¿Qué le recomendaría? Jusfifiqud su respuesta.

6.91. En el ejercicio 6.89, suponga que la duración del periodo de revisión T también es una variable de decisión. Encuentre T^* si el costo de una revisión es $100. *{Sugerencia:* Simule un intjervalo de valores de *T.)*

6.92. Un granjero cría pollos en forma industrial. Los gallineros tienen cierto grado de automatización. En particular, el sistema de distribución de alimento es automático. Para prevenir enfermedades en los pollos, el granjero pone un aditivo nutritivo al alimento.

Tiene un inventario de este aditivo y lo maneja usando un sistema de revisión periódica. La demanda mensual tiene distribución normal con media de 50 Ib y desviación estándar de 75 Ib El tiempo de entrega es cuatro semanas y el granjero estima que el costo de mantener el inventario es 20% anual. El costo de ordenar es $170 por orden. Se requiere una tasa de surtido del)8%.

a) Suponga que el inventario se revisa cada seis semanas y encuentre el inventario metí i óptimo.
b) ¿Cuál es el costo esperado anual de esta política para el granjero?
c) ¿Cuál es el inventario de seguridad?
d) ¿Cuál es el número esperado de "libras que faltan" al año?
é) ¿Cuál es el costo implícito por faltantes?

6.93. Resuelva el problema 6.92 suponiendo que la demanda mensual tiene: distribución uniforme £on 0<Z)<200.

6.94. Sheri es distribuidora de automóviles en un área rural. Ella tiene clientes que poseen vehículo^ re lativamente viejos. Para ofrecer un buen servicio a clientes, Sheri mantiene un pequeño nventkrio de refacciones para modelos viejos. Un artículo son los refuerzos de los frenos. Se trata de urj ar tículo que se mueve despacio, por lo que usa una política de revisión periódica con un period^) de revisión de dos meses. La demanda anual de los refuerzos tiene distribución normal con medi^ de 15 y desviación estándar de 5. Como este artículo ya no se produce, el tiempo de entreg a es cinco meses. El costo de un juego de refuerzos es $500. Sheri asigna un valor alto a la satisf acciórj del cliente. Entonces, considera que la buena voluntad es crucial y estima que el faltaute cubsta $5000. Los faltantes se pueden surtir atrasados y el costo anual de mantener el inventario es 20%.

d) Encuentre el inventario meta óptimo.
b) Encuentre el nivel de servicio implícito para las políticas 1 y 2. Analícelo.
c) Encuentre el inventario de seguridad para los refuerzos de frenos.
d) Encuentre el costo anual esperado de la política de revisión periódica.
e) Suponga que se usa la política de revisión continua. Encuentre el inventario de sejguridad.

6.95. En el problema 6.94, suponga que la demanda anual es 15 y determinística. Se usa una polítieja de revisión periódica. Encuentre el costo promedio de la incertidumbre, definida como $K_s - K_D$

donde K_s = costo anual esperado del caso estocástico
K_D = costo anual promedio del caso determinístico

9.96. Considere un sistema *(s, S),* con $s = 80$ y $S = 200$. La demanda pronosticada para loi próximos 12 meses se muestra en la tabla que sigue. El inventario inicial es 180, el tiempo de entrega es pero y la revisión se hace al final de cada mes. Encuentre el lote económico.

Mes,/	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Demanda,/)	65	110	80	150	120	90	50	170	140	125	55	80

6.97. *a)* Resuelva el ejercicio 6.96 suponiendo que el tiempo de entrega es x = 2 meses.
b) Repita el inciso *a)* para una revisión cada 2 meses. Compare.

6.98. Considere el inventario de subensambles de la Aerocon Company descrito en el problema 6.69. Suponga que en lugar de revisión continua, las revisiones se realizan cada dos semanas, usando la política *(s, S).*

a) Establezca la política *(s, S).*
b) La demanda de subensambles para las siguientes 12 semanas se pronostica como sigue:

Mes, *t*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Demanda, *D*	20	32	16	28	35	42	38	28	18	34	40	18

El inventario inicial es 45. Determine el número de subensambles que deben ordenarse siguiendo la política *(s, S).*

6.99. El gerente de Info Business Equipment (IBE) del ejercicio 6.63 está considerando usar la política *(s, S)* para manejar su inventario de discos duros. Para hacerlo, selecciona valores de demanda al azar para los próximos 12 meses a partir de una distribución normal *N* (250,10 000).

a) Establezca la política *(s, S)* para IBE.
b) Genere el valor de la demanda para IBE y determine el número de discos duros que deben ordenarse en esos 12 meses, suponiendo que el inventario inicial es 120.

3.4 Comparación de decisiones de tiempo

En la tabla 6-17 se da una comparación de los diferentes modelos presentados en esta sección. Los dos sistemas principales que se estudiaron son los sistemas de revisión continua y periódica. Una diferencia importante es que el inventario de seguridad requerido para los sistemas de revisión continua es menor que el necesario para los de revisión periódica. La implantación de los dos sistemas se analiza en la siguiente sección.

4 DECISIONES DE CONTROL

Se ha introducido una gran variedad de modelos, políticas y enfoques para los diferentes aspectos de los sistemas de inventarios. Ahora se estudiará la administración y el control de sistemas de inventarios de artículos múltiples. ¡Los sistemas de artículos múltiples pueden tener 300, 3000,30 000 o incluso 300 000 artículos! De todas maneras se quiere minimizar el costo y maximizar el servicio.

En la sección 1.6, se analiza la relevancia de los modelos de inventarios. Se hizo hincapié en la importancia de los modelos clásicos de inventarios no sólo para obtener una solución, sino para mejorar su comprensión. Para ayudar a esta comprensión se analiza un enfoque administrativo para el control del inventario bajo condiciones reales. Para comenzar, se presenta el análisis de Pareto, una herramienta importante en el manejo de sistemas de artículos múltiples.

TABLA 6-17
Comparación de las decisiones de tiempo

Modelo	Política	Demanda	Objetivo	Punto de Reorden	Decisión de tiempo	Decisión de cantidad	Aplicación	Observaciones
Voceador	Un solo periodo	Estocástica	Costo esperado mínimo	R	Antes del periodo	$F(Q^*) = \frac{\pi}{\pi + c_0}$	Un periodo de demanda, venta al menudeo	
EOQ	Revisión continua	Uniforme/ determinística	Costo mínimo	$D\tau - b$	$X_t \leq R$	$\sqrt{\frac{2A\bar{D}}{h}}$	Materia prima o venta al menudeo	
EPQ	Revisión continua	Uniforme/ determinística	Costo mínimo	$D\tau - b$	$X_t \leq R$	$\sqrt{\frac{2A\bar{D}}{h(1-D/\psi)}}$	Producción	Tasa de producción finita
(Q, R)	Revisión continua	Estocástica	Costo esperado mínimo	$\bar{D}\tau + z\sigma_\tau$	$X_t \leq R$	$\sqrt{\frac{2A\bar{D}}{h}}$	Materia prima o venta al menudeo	z fija usando política 1 o política 2
Inventario base	Revisión continua	Estocástica	Costo esperado mínimo	$\bar{D}\tau + z\sigma_\tau$	Cada retiro	Hasta R	Artículos costosos	
Dos contenedores	Revisión continua	Estocástica	Costo mínimo	Contenedor 2: $\bar{D}\tau + z\sigma_\tau$	Cuando el contenedor 1 está vacío	$\sqrt{\frac{2A\bar{D}}{h}}$	Artículos de bajo costo	
EOQ	Revisión periódica	Uniforme/ determinística	Costo mínimo	—	$T = \sqrt{\frac{2A}{h\bar{D}}}$	—	Materia prima o venta al menudeo	
(S, T)	Revisión periódica	Estocástica	Costo esperado mínimo	$\bar{D}(T + \tau) + z\sigma_{T+\tau}$	$T = \sqrt{\frac{2A}{h\bar{D}}}$	Hasta R		z fija usando política 1 o política 2
Reabastecimiento opcional	Revisión periódica	Estocástica		s	$T = \sqrt{\frac{2A}{h\bar{D}}}$	Hasta S		

Nota: Todos los modelos son de un solo artículo, con tiempo de entrega conocido τ.

4.1 Análisis de Pareto

El análisis de Pareto, una herramienta para separar lo "importante" de lo "no importante", es una técnica útil para asignar esfuerzo administrativo. Su nombre se debe al economista italiano Villefredo Pareto, quien estudió la distribución de la riqueza en Milán en el siglo XVIII. Observó que una porción grande de la riqueza era propiedad de un pequeño segmento de la población. El mismo principio de **Pareto** se aplica a muchas otras situaciones; unos cuantos tienen mucha importancia y muchos tienen muy poca importancia. Es común que los sistemas de inventarios tengan unos cuantos artículos que dan cuenta del uso (o venta) de una gran cantidad de dinero. Esta característica permite un trueque entre la inversión y el control, elemento importante para mantener un costo bajo y un alto nivel de servicio.

Dickie (1951) de General Electric fue el primero en aplicar el principio de Pareto. Él le llamó análisis ABC; los artículos A son esos pocos artículos "importantes" y los C son los muchos "no importantes". Los artículos B caen entre los A y los C. En la industria, el análisis de Pareto se conoce como análisis ABC. Para ser precisos, se llamará ABC a la herramienta y Pareto a la teoría.

4.1.1 La curva ABC

La curva ABC jerarquiza los artículos en inventario en orden descendente por su uso (o venta) anual en dinero. Esta jerarquía en forma tabular se llama distribución por valor; la tabla 6-18 es un ejemplo típico. Se puede granear el porcentaje de artículos jerarquizados del total de artículos contra el porcentaje acumulado correspondiente del valor total en dinero, representado por ese porcentaje de artículos jerarquizados. La gráfica de la figura 6-26 corresponde a la tabla 6-18. En principio, los artículos jerarquizados se clasifican en tres grupos:

A = artículos con "alto uso de dinero"
B = artículos con "uso medio de dinero"
C = artículos con "bajo uso de dinero"

Por lo general, las curvas ABC muestran que el grupo A significa alrededor del 20% de los artículos jerarquizados y el 80% del uso total del dinero. En ocasiones esto se llama regla "80-20". El que estos dos números sumen 100 es simple coincidencia.

En forma más detallada, el procedimiento para preparar las curvas ABC es

Paso 1: Se tabulan los artículos en inventario en orden descendente del uso anual del dinero por artículo. El uso anual del dinero es la multiplicación del costo unitario y el número anual de unidades usadas.

Paso 2: Se evalúa la actividad acumulada comenzando al principio de la lista y acumulando las actividades por artículo hacia abajo.

Paso 3: Se trabaja hacia abajo y se calcula:

- Porcentaje acumulado de artículos basado en el número total de artículos
- Porcentaje acumulado de uso del dinero basado en el uso total anual

Paso 4: Se gráfica la curva ABC del porcentaje acumulado del uso del dinero como una función del porcentaje acumulado de artículos.

TABLA 6-18
Distribución por valor

Intervalo	% de artículos activos	Uso anual del dinero	Uso anual acumulado del dinero	% acumulado del uso total
1	0.0034	292 150	292 150	1.43
2	0.0069	225 549	517 699	2.53
3	0.0103	153 418	671 117	3.28
4	0.0138	149 797	820 915	4.01
5	0.0172	146 697	967 614	4.73
6	0.0207	135 362	1 102 976	5.40
7	0.0241	131 011	1 233 987	6.04
8	0.0276	130 760	1 364 857	6.68
9	0.0310	124 702	1 489 559	7.29
10	0.0344	122 959	1 612 518	7.89
11-25	0.0861	63 672	2 907 815	14.23
26-77	0.265	28 900	5 113 576	25.03
78-119	0.410	21 205	6 144 048	30.08
120-248	0.854	12 387	8 170 675	40.00
249-461	1.59	7 418	10 214 450	50.00
462-820	2.82	4 464	12 254 380	60.00
821-1 435	4.94	2 559	14 298 174	70.00
1 436-2 543	8.76	1 338	16 339 170	80.00
2 544-5 061	17.43	491	18 381 088	90.00
5 062-8 151	28.07	219	19 402 217	95.00
8 152-9 197	31.67	172	19 606 515	96.00
9 198-10 565	36.38	129	19 810 651	97.00
10 566-12 496	43.03	86	20 014 900	98.00
12 497-15 650	53.89	47	20 219 132	99.00
15 651-16 279	56.06	42	20 247 133	99.13
16 280-18 001	61.99	30	20 307 996	99.43
18 002-20 443	70.40	18	20 364 329	99.71
20 444-24 009	82.68	7	20 407 231	99.92
24 010-29 037	1.00	0	20 423 347	100.00

Fuente: Herron (1976). Reimpreso con permiso del Institute of Industrial Engineers, 25 Technology Park/Atlanta, Norcross, GA, 30092, copyright © 1976.

tículos, por lo que se seleccionaron algunos valores para la tabla. La descripción gráfica de la distribución por valor —la curva ABC— se muestra en la figura 6-26 (curva 1).

Algunas observaciones sobre la curva ABC:

No se ha fijado una convención en cuanto a qué artículos están en los grupos A, B V C. Bsto se hace casi siempre "a ojo" viendo la curva. En general, el grupo A llega hasta donde pomienza a doblar la curva, el B hasta el final de este doblez y el C incluye el resto 4e los artículos.

- La figura 6-26 muestra otras dos curvas (2,3). Éstas son menos "inclinadas" y es más difícil distinguir entre A y B.

  Por lo común, mientras más inclinada es la curva ABC, mayor **poder de separación** tiqne. El poder de separación es la habilidad para distinguir entre los grupos. Esto es, nienos artículos representarán un valor más alto, por ejemplo, 15% de los artículos sigr|ificar| el 90% del valor. Para este ejemplo, alrededor de 1.5% de los artículos representan el *5$%* del valor.

- En la práctica, es sencillo generar la tabla de distribución por valor y su curva AB^ asociada. Tanto el precio unitario del artículo como su uso anual son paite de la base de ¡datos del

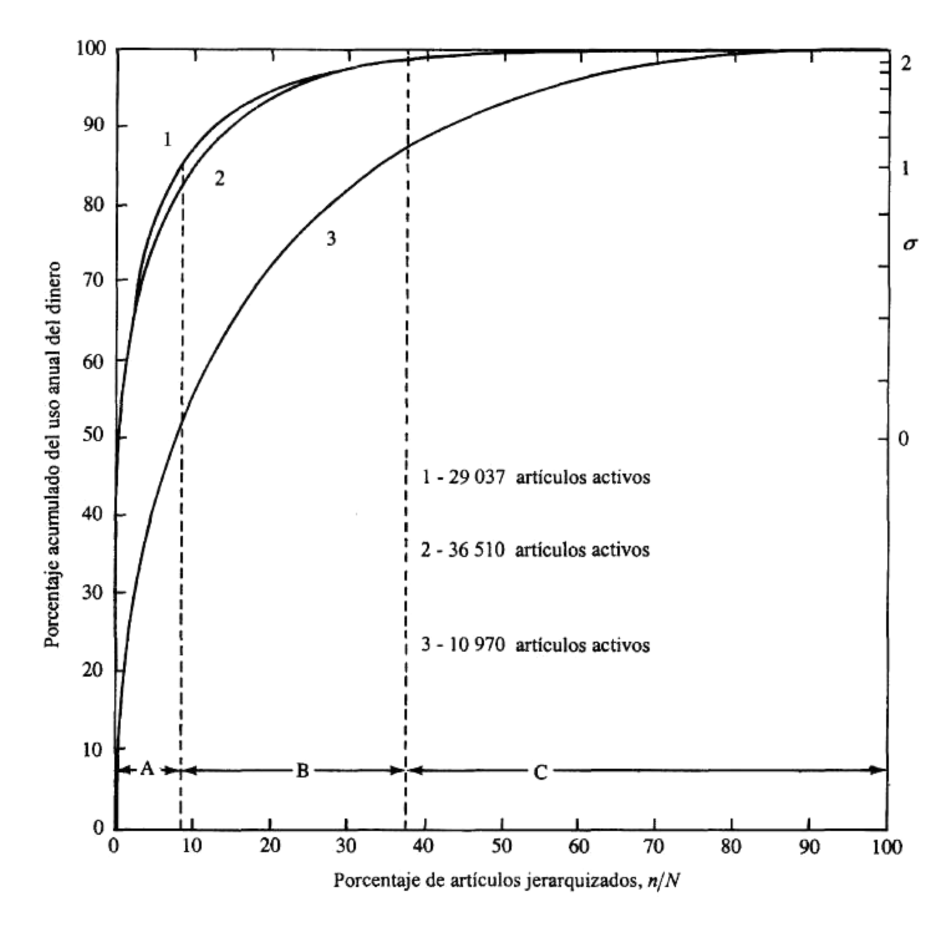


FIGURA 6-26
Curvas ABC para tres compañías *[Fuente:* Herrón (1976). Reimpreso con permiso del Institute of Industrial Engineers, 25 Technology Park/Atlanta, Norcross, GA 30092, copyright© 1976.]

inventario. Un programa sencillo puede usar estos datos para generar la tabla. En la tabla 6-19 se muestra una parte de la salida de computadora.

El costo unitario no es razón para colocar un artículo en el grupo A. Un artículo de bajo costo con un alto uso anual se puede clasificar como artículo A y viceversa.

Este análisis muestra la manera en que el principio de Pareto ayuda a asignar el esfuerzo administrativo. El grupo A, que representa la mayor parte de la inversión en inventario, tiene un control estrecho. Los artículos del grupo C obtienen poca atención administrativa, no valen el esfuerzo.

4.1.2 ANÁLISIS DE LA CURVA[3]

La distribución por valor —la distribución de Pareto— se aproxima por la distribución lognormal. Esta distribución es aquella para la que la función de densidad de probabilidad del logaritmo natural de la variable aleatoria es normal. Sea

[3] Adapatado de Herrón (1976). Reimpreso con permiso del Institute of Industrial Engineers, 25 Techonology Park/ Atlanta, Norcross, GA 30092, copyright © 1976.

n —artículo con *jerarquía n*

N = número de artículos

C_n = uso anual en dinero del artículo con jerarquías

C = uso total anual para todos los artículos

C_n es la variable aleatoria; entonces ln C_n tiene distribución normal. Las estadísticas de la distribución lognormal son las siguientes:

$$z_n = \frac{\ln C_n - \mu}{\sigma}$$

es la variable lognormal estándar, similar a

$$\frac{x - \mu}{\sigma}$$

para la distribución normal. Además

u = logaritmo natural del gasto anual en dinero para la mediana de los artículos jerarquizados a = desviación estándar de la distribución de probabilidad lognormal

#	Artículo núm.	Descripción	Unidades anuales	Costo unitario	Gasto anual, $	Gasto acum. $	Gasto acum. %	Artículos acum. %
1	850170	Cuerpo de plástico	4945	49.50	24478	244778	13.50	0.90
2	615200	Motor	3965	47.50	188338	433116	23.90	1.80
3	425150	Manija	9750	17.30	168675	601791	33.20	2.70
4	530010	Cubierta de ensamble	6150	17.95	110393	712184	39.30	3.60
5	120211	Bobina	9850	11.20	110320	822504	45.40	4.50
6	531110	Cubierta delantera	9000	7.25	65250	887754	49.00	5.40
7	470115	Cable	9419	5.40	50863	938617	51.80	6.30
8	770811	Agarradera	4875	8.30	40463	979080	54.00	7.10
9	615300	Motor	700	49.50	34650	1013730	55.90	8.00
10	530005	Cubierta de ensamble	4500	7.62	34295	1048025	57.80	8.90
11	850171	Cuerpo de plástico	700	47.50	33250	1081275	59.70	9.80
12	532015	Cubierta trasera	3990	8.30	33117	1114392	61.50	10.70
13	110570	Parrilla	9800	3.05	29890	1144282	63.20	11.60
14	480001	Conector	5454	5.40	29452	1173734	64.80	12.50
15	425110	Manija	3190	8.30	26477	1200211	66.20	13.40
16	101050	Placa de metal	6500	3.81	24765	1224976	67.60	14.30
17	120570	Caja	6750	3.61	24368	1249344	68.90	15.20
18	615150	Motor	500	47.50	23750	1273094	70.30	16.10
19	770822	Agarradera	2825	8.30	23448	1296542	71.60	17.00
20	110580	Parrilla	7475	3.05	22799	1319341	72.80	17.90
21	470120	Zapata de cable	13859	1.55	21481	1340822	74.00	18.80
22	531105	Cubierta delantera	5450	3.81	20765	1361587	75.10	19.60
23	850172	Cuerpo de plástico	407	49.50	20147	1381734	76.30	20.50
24	252212	Tornillo cónico	13139	1.49	19577	1401311	77.30	21.40
25	532110	Cubierta trasera	4875	3.81	18574	1419885	78.40	22.30

Nota: Sólo se muestra una parte de la salida de computadora.

La v

interesante, como se verá después.

Según Herrón (1976), la ecuación para la distribución lognormal que se aplica a una población de artículos múltiples es

$$\frac{n}{N} = \int_{z_n}^{\infty} \phi(y)\,dy$$

donde $\phi(y)$ es la función de densidad de probabilidad de la distribución normal. Se puede demostrar que

$$\frac{1}{C}\sum_{i=1}^{n} C_i = \int_{z_n-\sigma}^{\infty} \phi(y)\,dy$$

donde

$$C = \sum_{i=1}^{N} C_i$$

Por definición en $n/N = 0.50$, la mediana de la jerarquía, $\ln C_n = \mu$ y por lo tanto $z_n = 0$, y para la mediana de la jerarquía se tiene

$$\frac{1}{C}\sum_{i=1}^{n} C_i = \int_{-\sigma}^{\infty} \phi(y)\,dy = \int_{-\infty}^{\sigma} \phi(y)\,dy$$

El lado izquierdo de esta ecuación es el porcentaje acumulado de gasto en dinero, y el lado derecho es la integral de la distribución normal evaluada entre -«yo, La figura 6-27 muestra esta situación: la función de densidad normal, *N(0,* 1), se ve con un área sombreada que corresponde a la integral de esta función.

Si a = l,representa 68.2% del área bajo la curva. Para a igual a 2 o 3, será 95.4% y 99.8%, respectivamente. Con base en la ecuación anterior, el porcentaje acumulado del valor monetario se "traduce" a su valor de a equivalente, usando la distribución de probabilidad normal; el valor de la curva ABC en *n/N* = 0.50 da el valor de apara la distribución lognormal. La escala de a se muestra en el lado derecho de la figura 6-26. Si se dibuja una recta vertical en *n/N* = 0.50, su intersección con la curva proporciona el valor de a

Existe también una manera analítica de obtener <r usando la distribución por valor (tabla 6-18). Herrón (1976) muestra que

$$\sigma = \ln\left(\frac{C_{0.50}}{C_{0.8413}}\right)$$

donde $C_{0.50}$ es el gasto en dinero del artículo en $n/N = 0.50$, y $C_{0.8413}$ es el gasto en dinero del artículo en $n/N = 0.8413$ (vea el ejemplo 6-29).

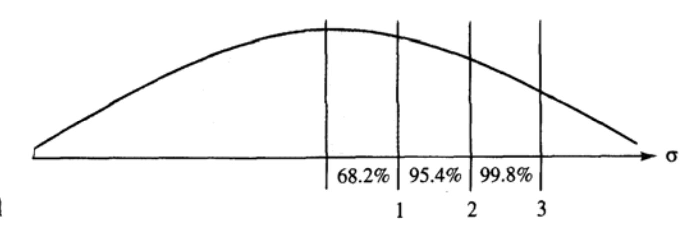


FIGURA 6-27
Función de densidad de probabilidad normal

¿Por qué o es tan importante? Se examinan las tres curvas que se muestran en la figura 6-26. Cuando *a* aumenta, el poder de separación de la curva ABC aumenta. Así, a es una medida del poder de separación de la curva y es más sencillo administrar y controlar una población de artículos en inventario con una a grande. Más aún, algunos tipos similares de productos tendrán valores parecidos de a. Algunos ejemplos de valores representativos son:

$0.8 < a < 2$ ventas al mayoreo y al menudeo
$20 < a < 26$ inventarios de refacciones
$26 < a < 3$ componentes electrónicas, componentes de alta tecnología

Un ejemplo ilustrará las curvas ABC.

Ejemplo 6-31. Análisis de Pareto. Considere los datos en la tabla 6-20. Se tienen 2 articulos con uso anual mayor que $300 000 y su uso total anual es $817 200. Hay 17 artículos con uso total anual mayor que $100 000, pero menor que $300 000; la utilización total anual de estos 17 artículos es $2 273 867. Evalúe la desviación estándar para los datos de esta tabla. Evalúe el poder de separación de la curva ABC correspondiente.

Solución. Calcule el porcentaje de artículos activos y el uso anual; éstos se dan en la tabla 6-21.
La desviación estándar de esta curva ABC es

$$\sigma = \ln\left(\frac{C_{0.5}}{C_{0.8413}}\right)$$

De las tablas, $C_{o\ 5}$ se encuentra entre los grupos 7 y 8; se aplica interpolación lineal para obtener la utilización anual:

$$\frac{50-46.15}{64.84-46.15} = \frac{C_{o\ 5} - 525\ 768}{166182-525\ 768} \qquad C_{05} = 451729$$

TABLA 6-20
Datos para el ejemplo 6-31

Grupo	Valor del uso anual	Número de artículos	Valor del uso	Número acumulado de artículos	Uso anual acumulado
1	> 300 000	2	817 200	2	817 200
2	100 000	17	2 273	19	3 091
3	30 000	70	3 902	89	6 993
4	10 000	19	3 262	282	10 255
5	3 000	39	2112 391	681	12 368
6	1000	66	1 161	1347	13 529
7	300	90	525 768	2 255	14 055
8	100	91	166 182	3 168	14 221
9	30	82	48 232	3 989	14 270
1	10	51	9 613	4 499	14 279
1	3	26	1678	4 761	14 281
1	1	89	183	4 850	14
1	0.3	31	21	4 881	14 281
1	0.1	5	1	4 886	14 281

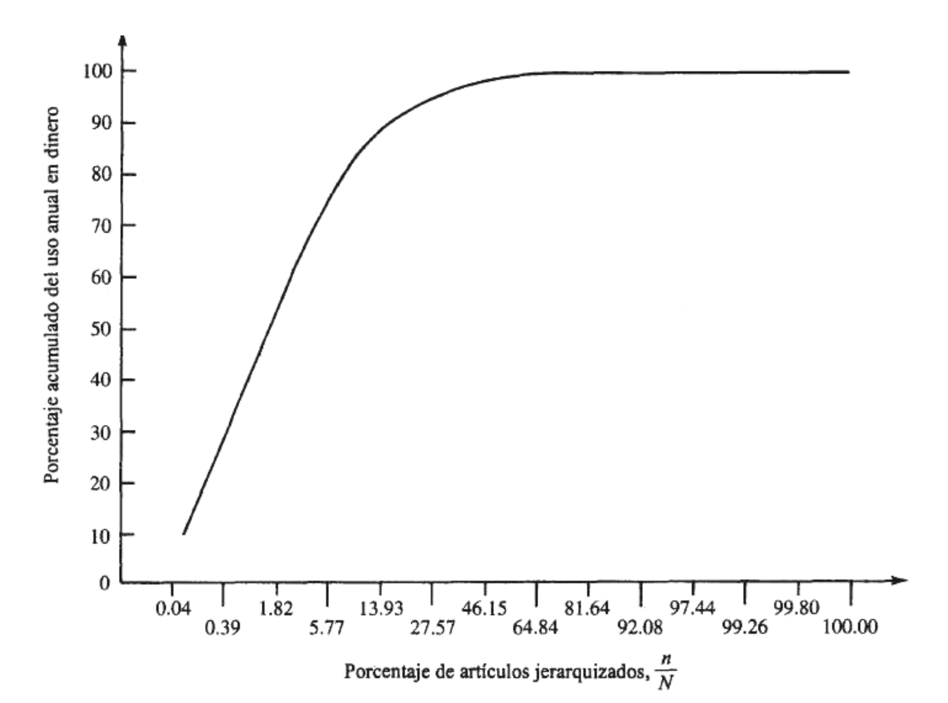


FIGURA 6-28
Curva ABC (ejemplo 6-31)

TABLA 6-21
Pocentaje de artículos y de uso

Grupo	% de artículos activos	% de uso anual
1	0.04	5.72
2	0.39	21.64
3	1.82	48.97
4	5.77	71.81
5	13.93	86.60
6	27.57	94.94
7	46.15	98.42
8	64.84	99.58
9	81.64	99.92
10	92.08	99.99
11	97.44	99.99
12	99.26	99.99
13	99.90	99.99
14	100.00	100.00

Empleando el mismo método para encontrar $C_{0.8413}$ se obtiene

$$\frac{84.13 - 81.64}{92.08 - 81.64} = \frac{C_{0.8413} - 48\,232}{9\,613 - 48\,232} \Rightarrow C_{0.8413} = 39\,021.4$$

De manera que

$$\sigma = \ln\left(\frac{C_{0.5}}{C_{0.8413}}\right) = \ln\left(\frac{451\,729}{39\,021}\right) = 2.45$$

La curva ABC, se muestra en la figura 6-28, tiene un poder de separación relativamente alto.

4.2 Sistemas de control de inventarios: un enfoque administrativo

Se analizará una metodología para establecer un control de inventarios en un medio anjibienije del mundo real. Este sistema tiene las siguientes características:

- Artículos múltiples
- Demanda estocástica
- Tiempo de entrega estocástico

Se supone que una computadora maneja y controla el sistema de inventario. Este sistema de control se puede usar para inventarios con demanda independiente o dependiente, o pan inveiji-tarios de materia prima o de producto terminado.

Los objetivos de este sistema de control son:

- Minimizar el costo, sinónimo de minimizar la inversión en inventario
- Maximizar la satisfacción del cliente, sinónimo de maximizar el nivel de servicio.

Maximizar el servicio a cualquier costo no presenta dificultad. Es más difícil hacerlo) con ún costo mínimo.

Un sistema de control de inventarios debe tomar en cuenta tres decisiones de inventarios básicas:

Decisiones de variedad: qué ordenar
- Decisiones de cantidad: cuánto ordenar

Decisiones de tiempo: cuándo ordenar

Estas decisiones se aplican a sistemas de uno o múltiples artículos. En los sistemas de c rtículbs múltiples se ha logrado tomar decisiones para muchos artículos. Primero se analiza el principio en que se basa el sistema de control de inventarios y después se describen sus componentes y su operación.

4.2.1 El principio fundamental

El principio fundamental es un trueque entre la **inversión** y el **control.** Es el resultado de combinar el concepto ABC con la tasa de surtido y se puede ver en la figura 6-29. La clasificación ABC se sobrepone a la curva de la tasa de surtido.

Se usará el siguiente razonamiento. Para artículos de poco valor (grupo C):

- Comprar un alto nivel de servicio (tasa de surtido) no es costoso.
- Invertir en inventario de seguridad.
- Relajar el control; los artículos se controlan en masa.

Un artículo "C" puede tener un "valor bajo" en uso anual monetario, pero puede| tener un costo por faltantes "alto". Como ejemplo, suponga que una pieza de equipo de $100 000 nc- se puede entregar porque falta la placa de $2 con el logo de compañía.

Para "artículos de valor alto" (grupo A):

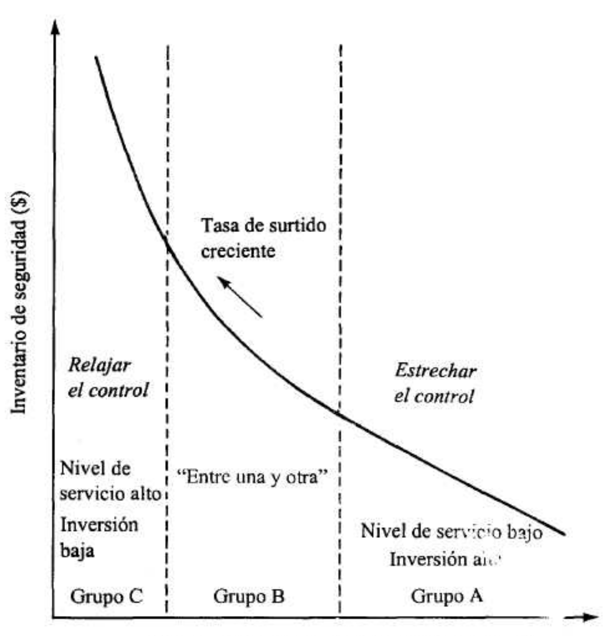


FIGURA 6-29
El principio que funda-
menta

Comprar un alto nivel de servicio es costoso.
Reducir la inversión en inventario de seguridad.
Estrechar el control; los artículos se controlan en forma individual.

Algunos artículos del grupo B caen en medio y su contra parece al del grupo C.

4.2.2 Diseño del sistema de control

Después de estructurar la clasificación ABC, se comienza por identificar artículos especiales. Éstos son los artículos de los grupos B y C que necesitan atención especial. Como ejemplo, se tiene

- Artículos que, si faltan, causan severos problemas de producción (por implicación, un cos to alto por faltantes)
- Artículos que tienen problemas de calidad al llegar
  Artículos con una vida corta en el almacén

Estos artículos necesitan un control individual y se incluyen en el grupo A.

El siguiente paso es desarrollar la estructura de control específica para cada grupo. La figura 6-30 muestra las principales componentes de control, que después se describir in con detalle.

4.2.3 Estructura de control

Se describe la estructura de control para los artículos A, B y C por separado. La política de control para el grupo A es *revisión periódica.* Por lo general, sus parámetros son:

Revisión periódica: una o dos semanas
Cantidad a ordenar: lote por lote (sección 2.2.1)
Inventario de seguridad: bajo, dos a cuatro semanas de la demanda pronosticada

Para el grupo A no se usa la tasa de surtido para establecer el inventario de seguridad. COIJIO consecuencia, un inventario se seguridad bajo representa una tasa de surtido baja. Esto se *compensa con el control individual.*

Para **planear** un inventario futuro para cada artículo, se usa una ecuación de balance de materiales.

$$\left\{\begin{array}{l}\text{Periodo de}\\\text{inicio del}\\\text{inventario}\end{array}\right\} + \left\{\begin{array}{l}\text{Periodo de}\\\text{recepciones}\\\text{programadas}\end{array}\right\} - \left\{\begin{array}{l}\text{Periodo de}\\\text{demanda}\\\text{pronosticada}\end{array}\right\} = \left\{\begin{array}{l}\text{Periodo de}\\\text{terminación}\\\text{del inventario}\end{array}\right\}$$

Para **supervisar** se usa la misma ecuación, pero:

En lugar de las recepciones programadas se usan las **recepciones reales.**
En lugar de la demanda pronosticada se usa la **demanda real.**

La herramienta usada en ambos casos es la tabla de balance de materiales para cada artíjculo (similar a la tabla 7-12). En cada punto de revisión se actualiza el balance: de materiales y se verifican faltantes, excedentes y punto de reorden de cada artículo.

Control de los grupos B y C. Los grupos B y C tienen la misma estructura de control. La política de control que se usa es **revisión continua.** La diferencia entre los dos grupos es el valor asignado a los distintos parámetros.

El enfoque es **control en masa** con **administración por excepción.** Los artículos se controlan como un grupo, no en forma individual. El estado de un artículo se verifica de: manara continua, y sólo cuando hay una excepción se notifica al administrador. Este enfoque permite manejar y controlar un sistema de inventarios de artículos múltiples.

Para establecer la estructura de control para la administración por excepción deten definirse cuatro parámetros. Éstos son el punto de reorden i?, la cantidad a ordenar *Q*, el inventario de seguridad *s* y el nivel máximo de inventario /$_{\text{máx}}$.

El **punto de reorden** se establece en

$$R = Dx + s$$

El tiempo de entrega, x, es una variables aleatoria y es prácticamente imposible establecer y mantener tiempos de entrega individuales para miles de artículos. Por lo tanto, se establece un tiempo de entrega para el grupo. Un grupo puede consistir en artículos similares, en artículos del mismo proveedor, etcétera. Se supone que el valor dex es más grande que el valor promedio para el grupo. I

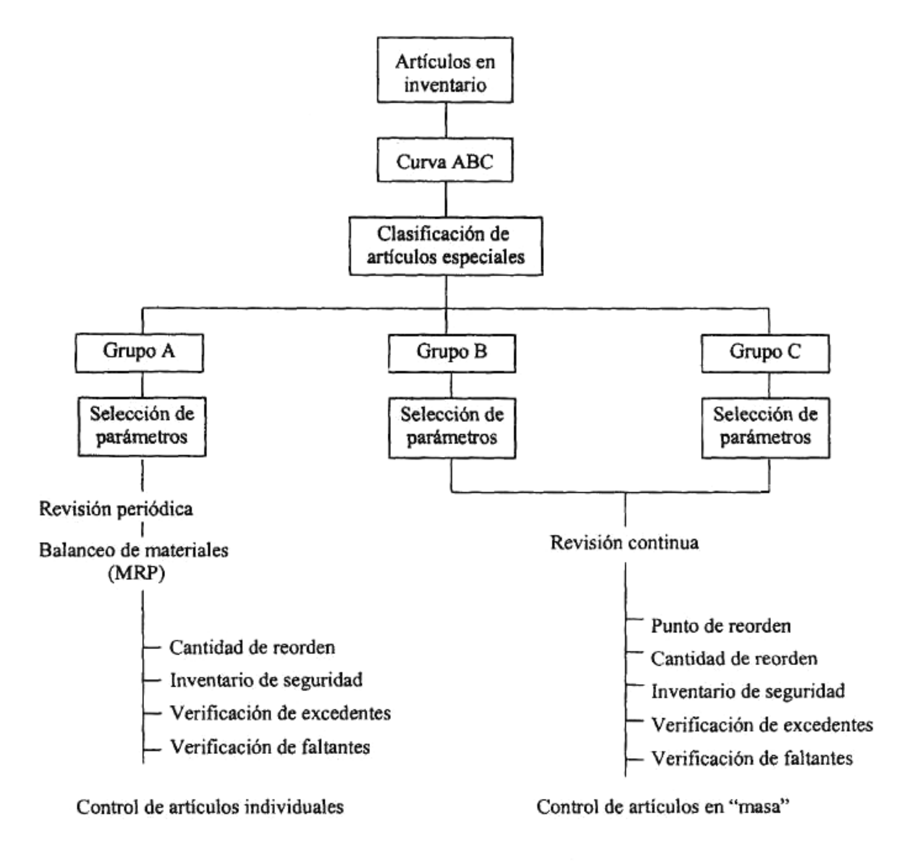


FIGURA 6-30
Diseño del sistema de control

Para la decisión de tiempo se usa la posición del inventario X,; si

$$X, < R$$

se emite otra orden.

Cantidad a ordenar. Se usan dos enfoques diferentes para el grupo B y para el grupo C.

Grupo B: En principio se ordenan cantidades que tienen alguna medida económica. Éstas pueden ser el EOQ, el mínimo costo unitario, cantidad de periodo fragmentado, entre otras.

Grupo C: Los artículos del grupo C se ordenan en lotes grandes -requerimientos del periodo establecidos- por lo común para 6 o 12 meses.

Inventario de seguridad. Se usa una tasa de surtido alta —más alta para el grupo C que para el B—. Esto casi siempre da como resultado que se tienen de 1.2 a 2.5 meses de demanda pronosticada en inventario para artículos del grupo B. Los artículos del grupo C tendrán en inventario alrededor de 3 meses de demanda pronosticada. Para estos artículos se supervisa el nivel del inventario de seguridad usando la siguiente prueba: si

$$/, \leq s$$

entonces se acelera la orden.

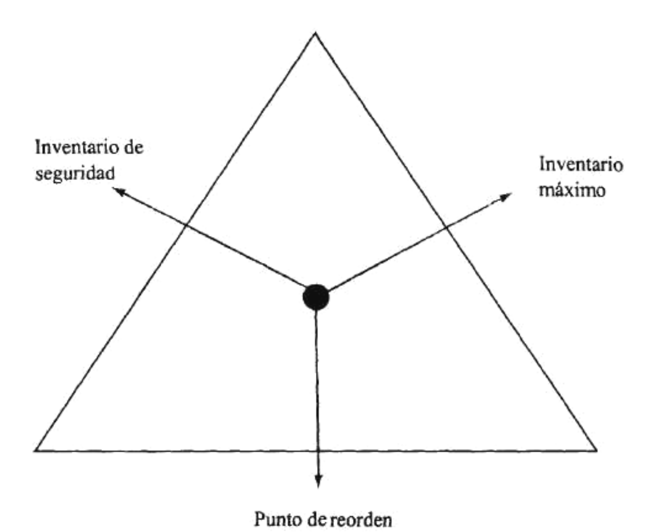


FIGURA 6-31
El triángulo de control

Inventario máximo. Debido al enfoque de control en masa empleado., existe el riesgcj de que el nivel del inventario pueda llegar demasiado alto para algunos artículos. Por lo tanto, ¡se establece un nivel de inventario máximo $/_{máx}$. Se mide en meses de demanda pronosticada, y la verificación del excedente es

$$X_t \geq I_{máx}$$

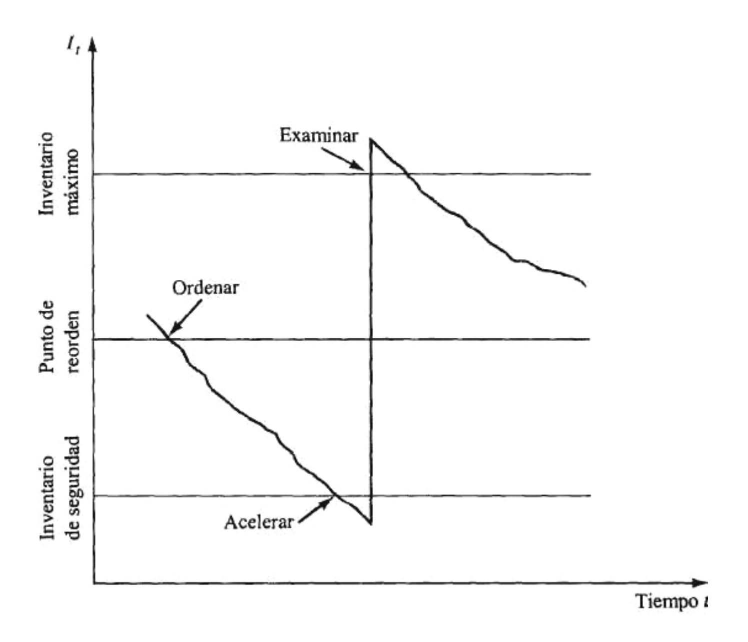


FIGURA 6-32
Acción administrativa

Control üei proceso (grupos B y C). Para cada artículo en inventario, se definen los parámetros punto de reorden, tiempo de entrega, inventario de seguridad e inventario máximo, y se guardan en una base de datos. Para cada transacción del inventario, la computadora verifica que el número de artículos esté dentro del triángulo de control mostrado en la figura 6-31. Mientras el artículo esté dentro de este triángulo (es decir, arriba del punto de reorden, arriba del inventario de seguridad y abajo del inventario máximo), no pasa nada. Un artículo que viola uno de estos límites se marca como excepción. El administrador del inventario obtiene un informe de excepciones, por lo común organizado en orden descendente según la urgencia de la acción a tomar. El orden de urgencia es:

- Artículos en inventario de seguridad
- Artículos a ordenar
- Artículos excedentes

Este informe, normalmente se genera una o dos veces al mes. Con las capacidades actuales "en línea", tal información está disponible en cualquier momento. La acción administrativa que debe tomarse en cada caso se muestra en la figura 6-32.

4.2.4 Resumen

La tabla 6-22 resume la estructura completa del sistema de control. Esta metodología, por supuesto, debe basarse en una computadora. Se puede programar, aunque muchos paquetes comerciales disponibles tienen muchas características de la metodología presentada aquí.

TABLA 6-22
Decisiones de control: resumen

	Grupo A	Grupo B	Grupo C
Principio de control	Control de artículos individuales	Control masivo	Control masivo
Política de inventario	Revisión periódica	Revisión continua	Revisión continua
Periodo de revisión	1 o 2 semanas	Ninguno	Ninguno
Punto de reorden	Ninguno	$D\tau + s$ $(X_t \leq R)$	$D\tau + s$ $(X_t \leq R)$
Cantidad de reorden	Lote por lote	EOQ, CUM, BPF	DPF
Inventario de seguridad	0.5 a 1.5 meses $(I_t \leq s)$	1.5 a 2.5 meses $(I_t \leq s)$	≈ 3 meses $(I_t \leq s)$
Inventario máximo	Bajo	Más que para el grupo A $X_t \geq I_{máx}$	Más que para el grupo A $X_t \geq I_{máx}$
Método de control	Ecuación de balance de materiales	Triángulo de control	Triángulo de control
Herramienta de control	Gráfica de balance de materiales	Informe de excepciones	Informe de excepciones

SECCIÓN 4 EJERCICIOS

6.100. Utilice la teoría de clasificación de Pareto para clasificar las unidades dentro de la clase AL la clape B o la clase C.

Artículo	Requerimientos anuales pronosticados	Costo unitario del artículo ($)
M 301	3000	0.20
M 764	3	1000.00
M 382	200	10.00
M 1216	500	10.00
M 870	50	250.00
M 387	1000	0.50
M 1242	1700	0.45

Además, grafique la curva y encuentre el valor de a a partir de la cuiva y analíticamente. ¿Óué puede concluir?

6.101. Grafique a escala las curvas de Pareto que tienen los siguientes valores de la desviación estándar:

$\sigma = 0$ $\sigma = 2$
$\sigma = 1$ $\sigma = 2.5$
$\sigma = 1.5$ $\sigma = 2.8$

Obtenga sus conclusiones.

6.102. Un inventario con distribución de Pareto tiene 100 artículos, CT = 3 y la utilización anjual de| artículo que es la mediana es $40.

á) Encuentre la utilización anual del artículo con jerarquía 84.
b) Comente sobre el poder de separación de esta distribución.

6.103. Utilice los datos de la tabla 6-18 y diseñe un sistema de control de inventarios para esta compañía. Entregue su plan en forma de memorando al vicepresidente de operaciones. Muestre todos los desarrollos y explique su razonamiento.

6.104. Repita el problema 6.103 para los datos de la tabla 6-19.

5 SOFTWARE

Durante la década de 1960 se desarrolló software con el único propósito de controlar el inventario. A principios de los 70, los paquetes de control de inventarios se convirtieron en parte de los sistemas de planeación de requerimientos de materiales y disminuyó el uso de los paquetes "sólo para inventarios". De esta manera, los paquetes para inventarios en sí son ahora más comunes en aplicaciones de venta al menudeo y servicio. Existen muchos paquetes comerciales; se mencionan dos de los primeros que establecieron el estándar para otros que siguieron. El primero, IMPACT (Inventory Management Program and Control Techniques), fue introducido por IBM a principios de los 60; contenía un sistema de pronósticos, el archivo del inventario y la lógica de control del mismo. El segundo paquete, INFOREM (Inventory Forecasting and Replenishment Modules), introducido por IBM en 1978, incluía un módulo mejorado de pronósticos, un sistema de revisión periódica, punto de reorden y tamaño de lote fijo similares a los descritos en la sección 3.3. El tamaño del lote era el EOQ. El punto de reorden era

$D(T + \tau) + s$, donde $s = z\sigma_{T+\tau}$. z se basaba en la distribución normal y una política 2 de nivel de servicio; se permitían faltantes. Muchos de los elementos del sistema de inventarios descritos en este capítulo estaban incluidos. Los paquetes más recientes incluyen políticas de revisión continua y la mayoría de los métodos de tamaño del lote descritos en la sección 2. Algunos paquetes son Manufacturing PM (Software PM, Inc.), Vantage (DCD), Flow Manufacturing Technology (American Software) e Inventory Interface (Data Interface).

6 EVOLUCIÓN

Los inventarios se han usado durante siglos. Recuerde el Arsenal de Venecia del siglo XV (capítulo 1), donde el inventario de materia prima tenía que mantenerse con el fin de que la producción de barcos continuara fluyendo.

El primer tratamiento cuantitativo del inventario fue el sencillo EOQ. Éste fue desarrollado en 1915 por Harris como parte de un sistema de inventarios que comercializó. Wilson (1934) creó interés en el EOQ en círculos académicos, al igual que en las industrias. Se publicaron muy pocos artículos más hasta principios de la década de 1950. Sin embargo, el trabajo sobre la teoría matemática de los sistemas de inventarios se inició durante la Segunda Guerra Mundial. El esfuerzo dedicado en la guerra detonó la investigación sobre sistemas determinísticos y estocásticos.

Desde principios de los 50, la investigación sobre sistemas de inventarios se ha multiplicado y ahora se cuenta con miles de trabajos publicados. Las revistas más importantes en Estados Unidos son *Operations Research, Management Science, IIE Transactions, Decisión Sciences, Production and Inventory Management, Naval Research Logistics Quarterlyy Mathematics of Operations Research.* Las tres publicaciones más importantes en Europa son *International Journal of Production Research, Operational Research Quarterly* y *Omega.*

Se resaltan aquí algunos acontecimientos importantes en el trabajo sobre inventarios. Los artículos que dieron fundamento al tratamiento riguroso de los modelos de inventarios son los de Arrow, Harris y Marschak (1951) y de Dvoretzky, Kiefer y Wolfowitz (1952a, b). Los modelos de descuentos por cantidad se atribuyen a Churchman, Ackoff y Arnoff (1957) y a Hadley y Whitin (1963). Estos dos autores se encuentran también entre los primeros en considerar restricciones de presupuesto y espacio. Los modelos *(Q,* i?)de revisión continua fueron analizados por Hadley y Whitin (1963) y más adelante tuvieron influencia en la metodología de muchos sistemas de inventarios comerciales. Bellman, Elicksberg y Gross (1955) usaron programación dinámica para resolver problemas de revisión periódica. Muchos artículos tratan sobre las políticas *(s, S).* Scarf (1960) e Iglehart (1963) demostraron la optimalidad de *(s, S),* mientras que Erhardt (1979) y después Freelan y Porteus (1980) desarrollaron técnicas de aproximación para estas políticas.

En los últimos años, los modelos de inventarios se han ampliado a sistemas escalonados, reparación de inventarios, artículos perecederos e incluso inventarios de bancos de sangre

A través de los años, se han publicado muchos libros sobre sistemas de inventarios. Se destacan dos de ellos que, en nuestra opinión, influyeron el pensamiento de una generación de investigadores. El primero es el libro de Hadley y Whitin (1963), que presenta un tratamiento muy claro de la teoría de inventarios. El segundo es el de Brown (1967); desarrolla teoría y aplicaciones a través de una perspectiva del mundo real e introduce las curvas de intercambio y niveles de servicio.

Con todo, la teoría de inventarios es un área importante y factible, tanto en sus aspjectos de investigación como de aplicación a situaciones reales.

Los inventarios son parte de la vida diaria en la industria y los negocios. No sorprí nde que algunos de los modelos y muchos conceptos descritos en este capítulo se usen ampliamente; se han incluido en muchos sistemas de software para el control de inventarios. Desafo tunadamente, la documentación en la literatura publicada sobre el grado de aplicación de los modelos de inventarios es relativamente escasa. Sin embargo, se han podido obtener algunas indicac:io nes.

A partir de encuestas, el modelo más utilizado es el EOQ. Un estudio de Osteryomg *et al.* (1986) investigó empresas de manufactura, de ventas al menudeo y mayoreo y de servicios. Encontraron que 84% de ellas usaban el EOQ, a pesar de sus deficiencias (sección 2.1.1).

El uso del modelo de lote por lote también es extenso. Sus aplicaciones se ampliEron dsspués de la introducción de la filosofía JIT (capítulo 10). Las tasa de surtido como indicación del nivel de servicio han recibido alguna atención en la industria. Como es natural, las *ipó* íticas de revisión periódica y continua para el control de inventarios son parte de cualquier sistema.

Son muchas las aplicaciones exitosas de modelos de inventarios que aparecen en la literatura. El común denominador es una inversión reducida en inventario con incremento i ;n el servicio al cliente. Destacan el informe de Kleutghen y McGee (1985) sobre el uso de un sistepia *(s, S)en* Pfizer Pharmaceuticals para el inventario de producto terminado. La evaluación del tamaño del lote se basó en el EOQ y el punto de reorden se calculó con base en el nivel de sei vicio. Desde 1985, el Departamento de Defensa de Estados Unidos ha girado instrucciones para que las oficinas de logística utilicen el modelo EOQ. Gardner (1987) reporta ahorros considerables en la U. S. Navy debidos al uso de modelos sencillos de revisión continua y EOQ. Dos revistas, *Production and Inventory Management* (publicada por APICS, American Pioduction and Inventory Control Society) e *Interfaces*, constituyen una buena fuente de aplicaciones de inventarios.

7 RESUMEN

Este capítulo está dedicado a inventarios, un amortiguador entre los procesos de abastecimiento y demanda. El inventario es un tema importante en la actualidad, en especial en el sector de manufactura. Puede mejorar tanto las utilidades como la competitividad.

Inventarios es un área amplia. Se estudió con un enfoque basado en las decisiones. Existen tres decisiones: de cantidad, de tiempo y de control. Como preámbulo se presentaron los conceptos generales de inventarios. Se consideraron sólo sistemas de demanda independiente, donde la demanda de un artículo no está relacionada con otro artículo.

Un inventario se crea por la diferencia en las tasas y los tiempos entre el abastecimiento y la demanda. Las causas de esta diferencia pueden ser cuatro factores: las economías de escala, el suavizamiento de la operación, el servicio al cliente y la incertidumbre. Existen tres tipos de inventarios: materia prima, trabajo en proceso y producto terminado. Cada uno incurre en cos tos que incluyen el costo de compra, el costo de ordenar (preparar), el costo de-maní ener y al macenar y los costos de operar el sistema. Estos costos sirven como base para el anal isis de los sistemas de inventarios, en donde se hace un trueque entre los beneficios de mantererlo y los costos asociados con tenerlo. La medida de efectividad para el inventario es el costo total pro medio por unidad de tiempo.

Las decisiones de cantidad y tiempo están gobernadas por dos políticas de control de inventarios: revisión continua y revisión periódica. Se usan ambas para estudiar y modelar sistemas de inventarios.

La relevancia de los modelos de inventarios es tema de debate. Aunque algunos tienen muchas aplicaciones, los autores piensan que el mayor beneficio obtenido es una mejor comprensión del comportamiento de estos sistemas.

Acorde con el enfoque orientado a las decisiones, primero se examinaron las decisiones de cantidad, es decir, cuánto ordenar. Estos modelos se conocen como modelos de "tamaño del lote". Pueden ser modelos estáticos (demanda uniforme) o dinámicos (demanda irregular). En ambos casos la demanda es determinística.

El modelo principal para el tamaño del lote estático es el modelo clásico del lote económico (EOQ). Las variantes de este modelo incluyen EOQ con faltantes, cantidad económica a producir (EPQ) y descuentos por cantidad. Se presentaron dos políticas de descuentos por cantidad: descuento en todas las unidades y descuento incremental. Se estudió una extensión del modelo EOQ de un artículo a artículos múltiples para el caso de un entorno con restricción de recursos, como presupuesto, espacio o ambos.

El análisis de modelos de tamaño de lote dinámico se organizó según cuatro métodos: reglas simples, métodos heurísticos, el algoritmo de Wagner-Whitin y la regla de Peterson-Silver. Las reglas simples no se basan en la optimización de una función de costo. Tienen otros méritos y están entre los más usados en la industria. Incluyen la cantidad a ordenar por periodo y lote por lote. Los métodos heurísticos intentan encontrar una solución de bajo costo que no necesariamente es óptima. Estos métodos se usan cuando es imposible obtener el óptimo o cuando el problema requiere demasiado tiempo o recursos. El método heurístico de Silver-Meal encuentra el costo variable promedio mínimo por periodo para un lapso de *m* periodos. El método de costo unitario mínimo (CUM) encuentra el costo variable promedio por unidad, mientras que el de balanceo por periodo fragmentado (BPF) minimiza la suma de los costos variables de todos los lotes. El algoritmo de Wagner Whitin es un enfoque de optimización. Por último, la regla de Peterson-Silver es una prueba que indica cuándo se tiene una demanda irregular.

La decisión de tiempo es la segunda decisión más importante asociada con los sistemas de inventarios —cuándo ordenar—. Esta decisión no sólo influye en el nivel del inventario y, por ende, en su costo, sino también tiene relación directa con el nivel de servicio al cliente. Igual que en el caso de las decisiones de cantidad, se incluyeron los modelos clásicos. Se agruparon bajo tres títulos: decisiones de una sola vez, decisiones de tiempo continuo y decisiones de tiempo intermitentes. Todos los modelos son de un solo artículo, pero se pueden extender a artículos múltiples. La mayoría de ellos permite demanda estocástica.

La decisión de una sola vez intenta determinar el número de artículos a ordenar antes del periodo de demanda, cuando la demanda es estocástica. Con frecuencia se conoce como el "modelo del voceador", la solución de este problema es indicativa de entornos de inventarios estocásticos.

Las decisiones de tiempo continuo se estudiaron revisando el entorno de un solo artículo, en el que el tiempo se toma como variable de decisión. Se consideraron los casos tanto del EOQ como del EPQ y se introdujo el concepto de punto de reorden, que depende del tiempo de entrega. Determinar el punto de reorden para el caso determinístico es sencillo. Sin embargo, cuando la demanda o el tiempo de entrega (o ambos) varían, se necesita el inventario de seguridad y el nivel de servicio.

Se presentaron dos políticas de nivel de servicio, las políticas 1 y 2. La política 1 es un "nivel de servicio del ciclo" y la política 2 usa la tasa de reabastecimiento. Ambas políticaí; se us&n para establecer el inventario de seguridad y los niveles de servicio.

Después se consideró el modelo *(Q, R*). Éste es el modelo central para los sistemas de Revisión continua con demanda estocástica. Tanto *Q* como *R* son variables de decisión, y! se uskn dos enfoques para calcularlas: uno administrativo y otro de optimización. También sej presentaron los conceptos de costo por faltantes implícito y de curvas de intercambio. Se conjcluyó la sección de sistemas de revisión continua con el inventario base y los sistemas de dos Contenedores, que tienen amplias aplicaciones en la industria.

El análisis de sistemas de revisión periódica se inició regresando al modelo EOJQ. Des pués, se analizó el modelo más importante de revisión periódica *(S, T).* Existen dos variabjes de decisión —el inventario meta y el periodo de revisión— y demanda estocástica. Parja el aná lisis se usó el enfoque administrativo fijando el nivel de servicio. El caso especial de rjsabastecimiento opcional concluye la sección.

En la sección sobre decisiones de control, se presentó una metodología práctica para con trolar un sistema de inventarios de artículos múltiples. Una herramienta de apoyo importante para el análisis ABC es la teoría de Pareto. Se presentaron tanto teoría como aplicación El con trol individual por artículo usando una política de revisión periódica y ecuaciones de balance de materiales es adecuado para los artículos A. Se usa control masivo para los articule s B y C, aplicando revisión continua junto con el concepto del triángulo de control.

Se concluyó el capítulo examinando el software para sistemas de inventario y la evolución de tales sistemas.

EJERCICIOS ADICIONALES

6.105. Al analizar el modelo para la tasa de reabastecimiento infinita, se manejó la demanda (forao una variable continua. Si *Q* * es grande, ese enfoque es satisfactorio y *Q* * se redondea al entero más cercano. No obstante, es educativo examinar el caso en el que la integridad de la demanda está ga rantizada. Para hacerlo, en lugar de igualar *[(dK(Q)/dQ*] = 0, se trabaja con la primera ciferencia de *K,* es decir, *AK(Q)= K(Q) - K(Q* - 1). El valor de *Q* * se obtiene satisfaciendo las dos ecua ciones en diferencias:

$$AK(Q^*) < 0 \qquad\qquad AK(Q^* + 1) > 0$$

Demuestre que si no se permiten faltantes, entonces *Q* * es la *Q* más grande tal que *Q(Q* -j 1) < *2AD/h.*

6.1**06.** El modelo de decisión de una sola vez se desarrolló usando un enfoque de minimización iel co^to. Sin embargo, también se puede obtener un modelo de maximización de la ganancia. Además d^ la notación de la sección 3.1, sea *c* el costo unitario, v el precio de venta por artículo, $7i_0$ la pérdida^ de buena voluntad en caso de faltantes además de la venta perdida y wel pirecio obtenido por las leni dades que quedan al final de periodo *(w < c).* Demuestre que el valor óptimo de *Q* está dado Jior

$$F(Q^*) = \frac{c - w}{v + \pi_0 + w}$$

6.107. Para el caso del EOQ con faltantes, analice el impacto sobre *Q* * y *b** de los valores dej *h, n,* ir.

6.108. Para el caso del EOQ con faltantes, demuestre que para ir = Oyix > 0 la política óptima es que no se permitan faltantes, o bien, que el artículo no se almacene.

6.109. Repita el problema 6.107 para el caso del EPQ con faltantes.

6.110. Repita el problema 6.108 para el caso del EPQ con faltantes.

6.111. Presidential Electrical Co. (PEC) fabrica tarjetas maestras para computadoras personales. La de manda de la tarjeta T686 es constante y conocida de 12 000 piezas para el año próximo. Una tarje ta maestra completa consiste en la tarjeta impresa, 4 módulos SIMM, 16 chips tipo AIC y 4 chips tipo BIC. La tasa de costo anual de mantener el inventario es 20%. La política de inventario básico para PEC es que no se permiten faltantes de ninguna pieza.

a) PEC compra los módulos SIMM a un proveedor; el precio es $30.00 por módulo. El costo de colocar la orden de los módulos SIMM es $100.00. ¿Cuál es el tamaño del lote económico? ¿Cuál es el costo promedio anual?

b) Se tiene una línea de producción para inprimir las tarjetas T686. También se usa para otros productos. La preparación de la línea para las T686 cuesta $150.00 y su capacidad es de 30 000 piezas al año. ¿Cuál es el tamaño del lote económico? ¿Cuál será el nivel del inventa rio promedio de las tarjetas maestras?

c) El chip A se compra a un distribuidor a un costo por orden de $50.00. El costo asociado por unidad es el siguiente (descuento en todas las unidades).

Costo unitario	$2.00	$2.80	$1.60	$1.50
Cantidad a ordenar *(Q)*	$Q < 3000$	$3000 < Q < 6000$	$6000 < Q < 9000$	$9000 < Q$

Determine la política óptima para ordenar. ¿Cuál es el costo promedio anual del inventario?

d) El costo de colocar una orden para el chip B es $75.00 y el costo unitario es $3.00. Determine la política óptima de inventario si no se pueden invertir más de $20 000.00 en él en cualquier momento para los dos tipos de chips IC. Determine el tamaño óptimo del lote para cada artículo. ¿Cuál es el costo promedio anual del inventario para cada artículo? (Suponga que el chip A cuesta $1.60 sin importar la cantidad ordenada.)

6.112. Apex Stereo produce diversos equipos de sonido. El de mayor venta es el MX-100 con 6000 uni dades de demanda constante durante el año. Cada sistema tiene una componente de disco compac to, que se puede comprar a cualquiera de dos proveedores. El proveedor A ofrece una política de descuento incremental; el costo unitario en una orden de 500 o menos será $20.00, las unidades excedentes a 500 cuestan $19.90. El proveedor B ofrece descuento en todas las unidades: hasta 500 el costo de cada una es $20.00, pero si la orden es de más de 500, todas las unidades cuestan $19.95. El costo de colocar una orden con cualquier proveedor es $100 y la tasa de costo de man tener el inventario es 20%. Su jefe le pide que haga una recomendación sobre qué proveedor usar y qué cantidad debe ordenarse. ¿Cuál es su recomendación?

6.113. Considere el problema 6.112, respecto a Apex Stereo. Debido a una inspección de calidad de las partes que llegan, la cantidad a ordenar debe ser una de las siguientes: 125, 250, 375, 500, 625, 750, 875,1000,1125,1250,1375 o 1500. Determine qué proveedor debe elegirse para cada una de estas cantidades.

6.114. En algunas ciudades de Europa existe un "mercado del día". Ésta es una forma de vender fruta y verdura frescas; los comerciantes colocan sus puestos en la mañana, por lo general en una de las plazas de la ciudad. Entre 2:00 y 3:00 P.M. desmantelan los puestos, lavan la plaza y no dejan ras tro del mercado.

Para evitar embotellamientos de tránsito durante el día, la ciudad permite que los camiones de abastecimiento entreguen su mercancía sólo una vez al día —temprano en la mañana—. No se puede hacer ningún reabastecimiento durante el día.

Uno de los mercaderes puede ordenar *n* artículos para su puesto. Suponga que el artículo *j* tiene un costo de c, dólares y precio de venta de *Vj* dólares por libra. La ciudad se compromete a com-

prar la mercancía no vendida al final del día y donarla a un banco de comida. La ciudad pagará vf>; dólares por libra (es obvio que *Wj* < c,). La demanda de un artículo es estocástica con fur ción 4e densidad de probabilidad *fjiPj).* El comerciante tiene sólo *M* dólares para comprar meicancí^.

Encuentre la cantidad óptima por artículo que debe comprar el mercader.

los distribuidores llegan de manera uniforme a Venus. Wilhelm trabajó con sus números e identificó la causa del error en la estimación de la demanda, sobre la que basó su propuesta. Preparó un propuesta actualizada para la política de inventarios de Le-Jeune.

Venus compra cuatro de los ingredientes que componen Le-Jeune a CHEMI, una compañía localizada en el centro de Francia. Como la fórmula de Le-Jeune es confidencial, estos ingredientes se etiquetan a, p, y y 8.

Venus manda un camión a recoger el material y lo trae a su almacén. Un viaje del camión cuesta $490, y puede llevar 4.5 tons. El costo de almacenar estos cuatro ingredientes es 25% anual. La demanda semanal de cada ingrediente y su costo por libra son los siguientes:

Ingrediente	Demanda semanal (lb)	Costo por libra
α	50	211
β	30	44
γ	102	63
δ	73	102

En uno de los últimos viajes a CHEMI, Robert, el chofer del camión, oyó el rumor de que CHEMI intenta subir el precio de a en 10%.

Ahora, Charlotte está totalmente confundida y necesita su ayuda.

a) ¿Cuál es la política de inventarios original propuesta por Wilhelm (con tasa de surtido de 90%)?
b) ¿Cuál es el costo extra en el que se incurre al aceptar la petición de Morris de 99.5% de tasa de surtido?
c) Analice la causa que hizo que Venus se equivocara al estimar la demanda.
d) ¿Cuál es la propuesta de inventarios actualizada por Wilhelm? ¿Qué función de densidad usó?
é) ¿Cuánto puede Venus reducir sus costos de inventario?
/) Proponga una política de compra para los ingredientes a, P, y y 8.
g) Existe una propuesta informal para que Venus mande un camión más pequeño a CHEMI. Su capacidad es de 1 ton; pero el viaje costaría sólo $200. ¿Cuál es su recomendación? *h)* Debido a los rumores del incremento en el costo de a, ¿cuánto debe comprar Venus ahora?

Escriba un memorando a Charlotte y conteste todos los incisos anteriores. Muestre en forma adecuada todos sus desarrollos.

8 REFERENCIAS

Arrow, K. A., Harris, T. E. y Marschak, J., "Optimal Inventory Policy", *Econometrica,* 19, 250-272, 1951. Bellman, R. E., Elicksberg, I. y Gross, O., "On the Optimal Inventory Equation", *Management Science,* 2,83-104,1955. Brown, R. G., *Decisión Rules for Inventory Management,* Dryden Press, Hinsdale, II, 1967.

Churchman, C. W., Ackoff, R. L. y Arnoff, E. L., *Introduction to Operations Research,* John (Wiley & Sons, Nueva York, 1957.

Dickie, H. F., "ABC Inventory Analysis Shoots for Dollars", *Factory Management and Maintenan^e,* 1951.

Dvoretzky, A., Kiefer, J. y Wolfowitz, J., "The Inventory Problems: I. Case of Known Distribjutions of Demand", *Econometrica,* 20,187-222,1952a.

Dvoretzky, A., Kiefer, J. y Wolfowitz, J., "The Inventory Problem: II. Case of Unknown Distritjutions^ of Demand", *Econometrica,* 20,450-466,1952b.

Erhardt, R., "The Power Approximation for Computing *(s, S)* Inventory Policies", *Management Science,* 25, 777-786,1979.

Freeland, J. R. y Porteus, E. L., "Evaluating the Effectiveness of a New Method of Computing iApproXi-mately Optimal *(s, S)* Inventory Policies", *Operations Research,* 28, 353-364, 1980.

Gardner,E. S.,"ATopDown Approach to Modelling US Navy Inventories",//i/er/aces, 17,4,1Í7,196*7.

Goyal, S. K., "Optimum Ordering Policy for a Multi ítem Single Supplier System", *Operat\onal Re search Quartely,* 25,2, 293-298,197'A. '

Hadley, G. y Whitin, T. M., *Analysis of Inventory Systems,* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1903.

Harris, F. W., "How Many Parts to Make at Once, Factory", *The Magazine of Management,* 10] 2, 135-136, 152, 1913.

Harris, F., "Operations and Costs", *Factory Management Series,* Shaw, Chicago, 48-52,1915

Herrón, D., "Industrial Engineering Application of ABC Curve", *AIIE Transactions,* 8, junio 1976.

Iglehart, D.L., "Optimality of *(s. S)* Policies in the Infinite Horizon Dynamic Inventory Problen", *Management Science,* 9, 259-267, 1963.

Kleutghen, P. P. y McGee, J. C, "Development and Implementation of an Integrated Inventory Management Program at Pfizer Pharmaceuticals", *Interfaces,* 15, 1, 69-87,1985.

Kumar, S. y Arora, S., "Optimal Ordering Policy for a Multi-item, Single Supplier System with Constant Demand Rates", *Journal ofthe Operational Research Society,* 41,4, 345-349,1990.

Osteryoung, J. A., McCarty, D. E. y Reinhart, W. J., "Use ofthe EOQ Model for Inventory Analysis", *Production and Inventory Management,* 27, 3, 39-45, 1986.

Peterson, R. y Silver, E. A., *Decisión Systems for Inventory Management and Production Planking,* Jphn Wiley & Sons, Nueva York, 1979.

Scarf, H. E., "The Optimality of *(s, S)* Policies in the Dynamic Inventory Problem", en Arrow, K.. D., Rarlin, S. y Suppes, P., eds., *MathematicalMethods in the Social Sciences,* Stanford, CA, Stamford University Press, 1960.

Silver, E. A. y Meal, H. C, "A Heuristic for Selecting Lot Size Quantities for the Case of a Determinjstic Time Varying Demand Rate and Discrete Opportunities for Replenishment", *Production and Inventory Management,* 14,64-74,1973.

Wagner, H, M. y Whitin, T. M., "Dynamic Versión ofthe Economic Lot Size: Model", *Management Science,* 5,1,89-96,1958.

Wilson,R.H., "A Scientific Routine for Stock Control", *Harvard Business Review,* 13,116-128,1934.

Woodruff, D., Treece, J. E., Bhargava, S. W. y Miller, K. L., "Saturn", *Business Week,* 86-91, agostcj 17, 1992.

CAPÍTULO

7 Planeación de producción, capacidad y materiales

En su forma más sencilla, la relación entre el mercado (cliente) y la instalación de producción es iterativa. La demanda del mercado pide a la instalación de producción que fabrique el producto que se envía al mercado para satisfacer la demanda. Cuando se genera más demanda, el proceso se repite (figura 7-1).

En algunos casos, este ciclo se realiza de manera casi instantánea. Recuerde el ejemplo de la tienda de donas del capítulo 6. Las donas, en principio, se pueden elaborar cada vez que un cliente entre. Es sencillo manejar los cambios en la demanda siempre y cuando se cuente con la materia prima.

En otros casos el ciclo toma más tiempo. La fabricación de automóviles, por ejemplo, requiere tiempo para que la producción responda a los cambios en la demanda. Un automóvil es un producto complejo y su producción no es inmediata; deben fabricarse componentes, comprarse materiales y tiene que ensamblarse la unidad. Se necesita realizar una gran cantidad de planeación, entre otras actividades, dentro de la componente de producción de la figura 7-1. En este capítulo se analiza la planeación de la producción, la capacidad y los materiales.

1 INTRODUCCIÓN

Muchos productos no son entidades simples. Están compuestos de subensambles y partes, algunas compradas y otras fabricadas. Un paso en la fabricación de un producto es un plan de producción. Un plan de producción especifica las cantidades de cada producto final (artículo terminal), subensambles y partes que se necesitan en distintos puntos del tiempo. Dos requeri-

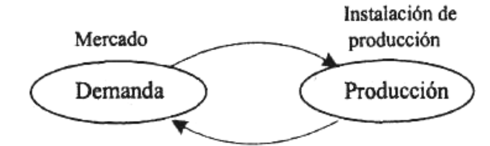


FIGURA 7-1
El ciclo de demanda-producción

mientos para generar un plan de producción son las estimaciones de demanda del producto final y un plan maestro de producción (MPS) que se usa para crear un plan de producción detallado.

Las estimaciones para la demanda del producto final se obtienen usando los métodos de pronósticos estudiados en el capítulo 4. Dado un pronóstico, se obtiene la cantidad requerida de cada componente para hacer el producto final. Aquí se hace la distinción entre **demanda dependiente y demanda independiente** (vea el capítulo 6, sección 1.2). La demanda independiente significa que no existe relación entre la necesidad de un artículo y cualquier otro artículo. (Esto no es lo mismo que independencia estadística.) Por lo general, los artículos con demanda independiente son productos finales, donde la demanda depende de las condiciones del mercado. Por otro lado, la demanda independiente implica que la necesidad de un artículo se crea por la necesidad de otro. Observe que *se pronostica* una demanda independiente, pero se *planea* una demanda dependiente.

La manufactura ocurre sólo cuando se necesitan productos con demanda dependiente. Per lo tanto, los modelos de inventarios desarrollados para artículos con demanda independiente (capítulo 6) deben modificarse para la demanda dependiente.

El **plan maestro de producción** (MPS) es un plan de entrega para la organización manu facturera. Incluye las cantidades exactas y los tiempos de entrega para cada producto terrninado. Se deriva de las estimaciones de la demanda, aunque no necesariamente es igual a ellas. El MPS debe tomar en cuenta las restricciones de fabricación y el inventario de producto te rminádo. Una restricción de fabricación importante es la *capacidad.* Así, para verificar la factibilidad del MPS se lleva a cabo una evaluación inicial de la capacidad. Esto se conoce como **planeación preliminar de la capacidad.** Si la capacidad disponible es insuficiente, se cambia el MPS.

Desglosar el MPS en un programa de producción para cada componente de un producto fi nal se logra mediante el sistema de **planeación de requerimientos de materiales** (MRP). El sistema MRP determina los requerimientos de materiales y los tiempos para cada etapa de pro ducción. Los faltantes de materiales son otra restricción importante en la manufactura. Como complemento a este proceso se tiene la **planeación de la capacidad.**

El proceso de planeación de la producción descrito se muestra en la figura 7-2. Este proceso tiene una estructura jerárquica, desde las estimaciones de la demanda hasta el MRP. Otta manera de ver este proceso es considerar que tiene una "parte frontal" y una "parte terminar. La parte frontal es la que interactúa con la demanda del cliente, y la parte terminal inieractifia con la ejecución del plan de producción. El MRP maneja la parte terminal: genera el plan para cumplir con la demanda dependiente.

El resto de este capítulo contiene un análisis profundo de las distintas etapas y conceptos del proceso de planeación de la producción. Comienza con el MPS, sigue con la planeación de la capacidad y culmina con el estudio de las características de los sistemas MRP.

7.1. ¿Qué es un plan de producción y cuáles son sus insumos?

7.2. La Julo Company fabrica marcadores de punta de fieltro. Analice la diferencia entre lá demanda de sus marcadores negros (uno de los 126 productos que hacen) y su demanda de fieltro.

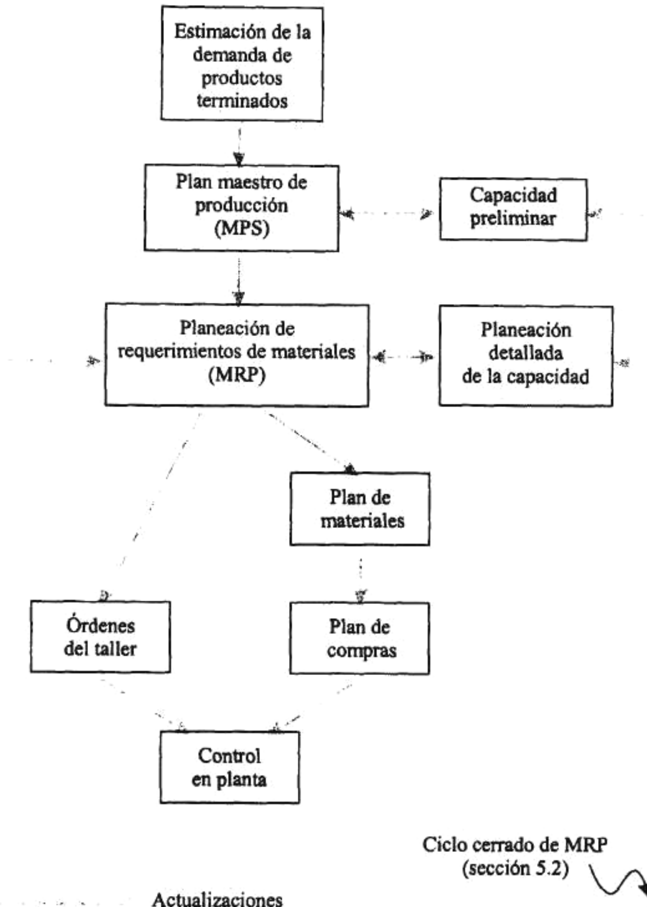


FIGURA 7-2
Proceso de planeación de la producción

2 PLAN MAESTRO DE PRODUCCIÓN

Panorama general

Un plan maestro de producción se genera ya sea a partir del plan agregado, si se dispone de él, o directamente de las estimaciones de la demanda de los productos finales individuales. Si el MPS se genera de un plan agregado, debe desglosarse en productos individuales. Un plan de producción agregado representa la medida global de producción de una compañía, mientras que un plan maestro de producción es un plan para fabricar —cuántos productos terminados deben fabricarse y cuándo se producirán—.

No debe confundirse el plan maestro de producción con un pronóstico. Un *pronóstico* representa una estimación de la demanda, mientras que *\mplan maestro de producción* constituye un plan para fabricar. No son lo mismo, aunque sus formatos puedan parecer similares. La diferencia es que un plan de producción considera el inventario existente, las restricciones de

capacidad, la disponibilidad de los materiales y el tiempo de producción; por lo tanto, ljas carjtidades de producción se pueden cambiar en el eje del tiempo según sea necesario. !

Al desarrollar un MPS, deben tomarse en cuenta la naturaleza del producto y el riercaáo. Por lo común se identifican tres tipos de entornos producto-mercado relacionados con el MIfS: producción para inventario (PPI), producción por pedido (PPP) y ensamble por pedido (EPp). La compañía con PPI produce en lotes y mantiene inventarios de producto terminado para^ la mayor parte de sus productos finales. La industria de electrodomésticos menores, en la que^ el fabricante almacena para la venta futura, es un ejemplo. La ventaja es que los tiempos de entjrega al cliente (entrega de estantes) se minimizan a costa de mantener inventarios de producios terminados. En este ambiente, el MPS se realiza a nivel de producto teraúnado. Se cor ipone de pronósticos de demanda y ajustes para el inventario de producto terminado. La producción comienza antes de conocer la demanda con precisión. El entorno de producción para inve ntario es típico de las compañías que fabrican relativamente pocos artículos pero que son estándar y tienen un pronóstico de demanda bastante exacto. Es común que las compañías que producen para inventario fabriquen un pequeño número de artículos finales a partir de una gran caitidad. de materia prima (incluyendo los artículos comprados), como se muestra en la figura 7-3.

En el otro extremo está el entorno de producción por pedido (figura 7-3). No se tiene un^ inventario de producto terminado y las órdenes de los clientes se surten zitrasadas. Se negocia j;on el cliente una fecha de entrega para cada producto y el artículo final se coloca en el programa maestro. La producción no comienza hasta que se tiene el pedido. Este ambiente de producción, por lo general, tiene un número grande de configuraciones de productos y es difícil anticipar las necesidades exactas de un cliente específico. Un buen ejemplo son los motores de propulsión; éstos se producen sólo como respuesta a la orden de un cliente. Casi siempre^ el número de artículos finales y subensambles excede el número de materiales; los mismos materiales se usan para muchos productos. El MPS consiste en fechas de entrega al clientej rígidp y se puede ver como determinado por las órdenes. El MRP planea la producción y los pronósticos de demanda se usan a nivel de materia prima.

El entorno ensamble por pedido está entre los dos extremos. Se ensambla un graa número de artículos finales a partir de un conjunto relativamente pequeño de subensambles «standar o módulos. La fabricación de automóviles es un ejemplo. La orden de un distribuidor especifica

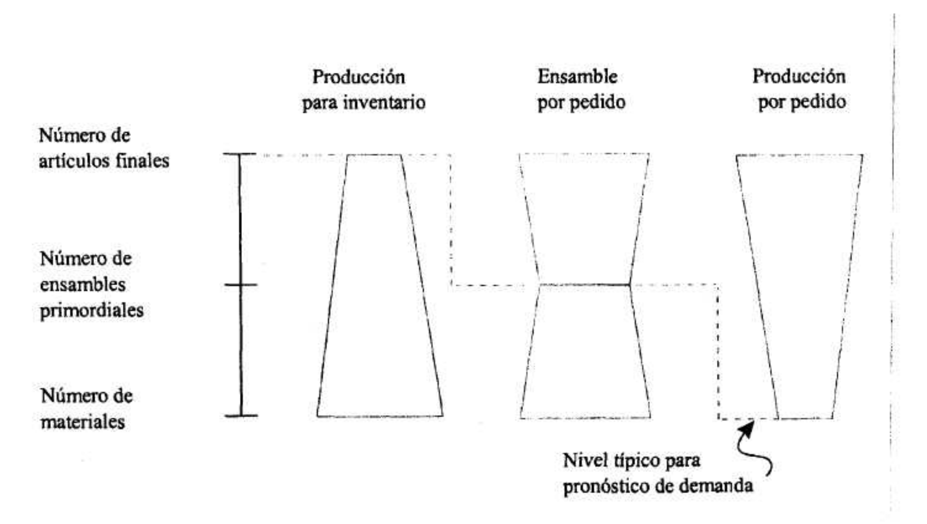


FIGURA 7-3
Entornos producto-mercado

qué opciones entre muchas se desean. La estructura del producto tiene la forma de un reloj de arena (figura 7-3). El número grande de artículos finales hace que las necesidades de pronósticos sean en extremo onerosas. Hace que tenga más sentido desarrollar el MPS para el módulo en lugar de a nivel de artículo final. Los módulos se fabrican para el inventario y el ensamble final se realiza cuando llega una orden de un cliente. De esta manera se logra un compromiso justo entre el costo de mantener inventario, la flexibilidad de productos y los tiempos de entrega.

Los ambientes de ensamble por pedido con frecuencia tienen dos programas maestros. Además del MPS, se tiene también un programa de ensamble final (PEF) a nivel de artículos finales. El MPS gobierna la producción de módulos y como tal está motivado por el pronóstico. El programa de ensamble final gobierna el ensamble del artículo final y está motivado por las órdenes. Existen dos tiempos de producción: el tiempo del MPS y el tiempo PEF. Cuando un cliente coloca una orden sólo se observa el tiempo del programa de ensamble final.

Ejemplo 7-1. MPS. Como un ejemplo hipotético del MPS, considere la compañía SIBUL que fabrica un número relativamente grande de teléfonos, los cuales difieren principalmente en el color y algunas características. Se eligen cuatro teléfonos en particular, a saber, tres modelos de mesa (etiquetados A, B y C) y uno de pared (D). En la tabla 7-1 se muestra un MPS semanal para esta línea de productos. En este punto, el MPS es igual al pronóstico de demanda para cada modelo.

Según este programa de producción, el modelo A se produce en cantidades uniformes de 1000 unidades por semana en enero y 2000 en febrero, mientras que las cantidades para los otros modelos son irregulares. Sin embargo, la producción mensual es estable en 12 000 unidades, lo que significa que se mantiene una fuerza de trabajo estable —característica deseable—. Observe que las cantidades para cada semana muestran el tiempo de terminación de las unidades, es decir, el número en cada celda es la cantidad que debe completarse al final de la semana asociada con esa celda.

TABLA 7-1
PMP semanal

	Enero				Febrero			
	Semana				Semana			
Producto	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Modelo A	1000	1000	1000	1000	2000	2000	2000	2000
Modelo B	—	500	500	—	350	—	—	350
Modelo C	1500	1500	1500	1500	1000	—	1000	1000
Modelo D	600	—	600	—	—	30	200	—
Total semanal	3100	3000	3600	2500	3350	2300	3200	3350
Total mensual	12 200				12 200			

2.2 Planeación del MPS

Para la planeación y mantenimiento del MPS se usan registros de las etapas en el tiempo. Las cantidades de producto se colocan en espacios de tiempo llamados baldes de tiempo. Por lo general, los baldes comprenden un mes o una semana. Estos registros se pueden producir en una computadora y sirven como insumo del proceso del MRP. La planeación del MPS se parece al proceso empleado para el control de inventarios (capítulo 6), en donde la ecuación de balance

de materiales era la herramienta básica. La diferencia primordial para el MPS es que se es^án manejando artículos finales, por lo que es necesario hacer algunas modificaciones.

Recuerde que el MPS es un pronóstico ajustado para el inventario, las órdenes de las clientes, las restricciones de producción, etcétera. Por lo tanto, un plan para el MRP debe t:ner elementos que conforman un plan de producción. Por lo común, estos elementos incluyen:

Pronóstico —un pronóstico de entrega en el tiempo para el artículo final.

Órdenes de clientes —cantidades para las que se tienen órdenes de clientes sóli4as y ijna fecha de entrega prometida.

Inventario de fin de periodo —inventario disponible al final del balde de tiempo.

MPS —cantidad de artículos finales cuya producción debe completarse en cierto jbalde de tiempo. Observe que debido al tiempo de entrega, la producción de esta cantidad debe comenzar antes.

Inventario actual —inventario disponible al inicio del primer periodo.

Para obtener el plan para el MPS se usa una tabla. Las columnas representan los tyaldes de tiempo y los renglones incluyen los elementos. Con el siguiente ejemplo, se muestra el proceso de planeación de MPS y los desarrollos requeridos.

Ejemplo 7-2. Planeación para el MPS. Suponga que se quiere el plan para el MPS para el modelo A del ejemplo anterior. La naturaleza del entorno producto-mercado es tsil que se trata de u n amb: ente de producción para inventario. (Se usa el mismo procedimiento para el ensamble por psdido.) Se supone que no se mantiene un inventario de seguridad para el artículo final. Para mostrar ul impacto de las distintas políticas de producción, se consideran dos de ellas: producción en lotes y 1 ate por lote. La tabla 7-2 muestra los datos iniciales. El balde de tiempo es una semana. El resto de los elementos se calculan; se estudiará ahora el método de cálculo.

Para calcular el inventario y los elementos del MPS se usa la siguiente versión de la e<puacióji de balance de materiales:

/, = /,_, + 0,-máx{F,,O,}

donde /, = inventario de producto terminado al final de la semana *t*

Q, - cantidad fabricada que debe completarse en la semana / (elemento del MP}>)

F, = pronóstico para la semana /

O, = órdenes de los clientes que deben entregarse en la semana *t*

Se puede verificar que esta ecuación representa un balance de materiales: el nivel del inventario actual es igual al nivel anterior más la producción programada menos la cantidad que se espera entregar. Como se trata de un ambiente de producir para el inventario, se espera entregar a cantidad pronosticada, amenos que las órdenes de los clientes excedan esa cantidad, esto es, míx{F,, *Q,}*.

Aquí *Q,* es la única variable de decisión en la ecuación; el resto está dado o bien son valores calculados.

Inventario actual = 1600	Semana							
	1	2	3	4	5	6	7	8
F_t	1000	1000	1000	1000	2000	2000	2000	2000
O_t	1200	800	300	200	100	0	0	0

Usando la ecuación de balance de materiales se pueden evaluar los valores de /, y los tiempos para *Q,*. Se comienza con una política de producción por lotes.

Producción por lotes. Suponga que el tamaño del lote por balde de tiempo es 2500. El procedimiento es como sigue:

1. Se usa la ecuación de balance de material para evaluar I_t, suponiendo que $Q_t = 0$.

$$I_t = \text{máx}\{0, I_{t-1}\} - \text{máx}\{F_t, O_t\}$$

$$Q_t = \begin{cases} 0 & \text{si } I_t > 0 \\ 2500 & \text{de otra manera} \end{cases}$$

2. Si $Q_t > 0$, se vuelve a evaluar I_t mediante $I_t = Q_t + I_{t-1} - \text{máx}\{F_t, O_t\}$.

Como ejemplo considere las primeras dos semanas:

Semana 1:

$$I_1 = \text{máx}\{0, 1600\} - \text{máx}\{1000, 1200\} = 400 > 0$$

es decir, $Q_1 = 0$.

Semana 2:

$$I_2 = \text{máx}\{0, 400\} - \text{máx}\{1000, 800\} = -600 < 0$$

es decir, se programa $Q_t = 2500$ y se evalúa I_2 de nuevo.

$$I_2 = 2500 + 400 - \text{máx}\{1000, 800\} = 1900$$

Los valores de /, y *Q,* para el resto de las semanas se muestran en la tabla 7-3, donde los valores de decisión están en negritas y los valores calculados están subrayados.

Cuando el MPS se basa en los pronósticos (por ejemplo, en sistemas de producir para inventario y ensamblar por pedido), es importante un concepto conocido cono **disponible para promesa** (DPP). Dados el programa maestro y el inventario de artículos finales, se puede asignar cierta cantidad a las órdenes de los clientes, con el recordatorio *disponible* para cumplir con demandas futuras. Así, cuando llega una nueva orden, DPP indicará si el programa tiene suficientes artículos disponibles para entregar la orden a tiempo. Si no es así, la orden tiene que revisarse o prevenirse. Se hace hincapié en que el MPS se genera usando *F,,O,* e /,. Sin embargo, el DPP no toma en cuenta los pronósticos, sólo la decisión del MPS, el inventario inicial y las órdenes de los clientes. La importancia

TABLA 7-3
Plan MPS

	Semana							
Inventario actual = 1600	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
F_t	1000	1000	1000	1000	2000	2000	2000	2000
O_t	1200	800	300	200	100	0	0	0
I_t	400	1900	900	2400	400	900	1400	1900
MPS		**2500**		**2500**		**2500**	**2500**	**2500**

TABLA 7-4
Plan final del MPS para la política de producción por lotes

Inventario actual = 1600	Semana							
	1	2	3	4	5	6	7	8
F_t	1000	1000	1000	1000	2000	2000	2000	2000
O_t	1200	800	300	200	100	0	0	0
I_t	400	0	0	0	0	0	0	0
MPS		**600**	**1000**	**1000**	**2000**	**2000**	**2000**	**2000**
DPP	400	0	700	800	1900	2000	2000	2000

de DPP estriba en el hecho de que puede dar al personal de ventas la flexibilidad de prometer fechas de entrega más exactas cuando llegan las nuevas órdenes.

En principio, el valor del DPP es la diferencia entre Q_t para cierta semana y el valor acumulado de las órdenes de los clientes entre esta semana y la siguiente, para la cual $Q_t > 0$. Para la pr imera pemana, se suma a Q, el valor del inventario actual. Para ilustrar esto, considere las primeras cuatro semanas.

1. DPP = 1600 + 0 - 1200 = 400
2. DPP = 2500 - (800 + 300) = 1400
3. Cubierto por el DPP de la segunda semana
4. DPP = 2500 - (200 + 100) = 2200

El DPP sólo puede tener valores positivos.

Los resultados se muestran en la tabla 7-4. El DPP debe actualizarse siempre que llegue una nueva orden.

Producción lote por lote. Con esta política, la cantidad fabricada cada semana es exactamente igual a la demanda esperada semanal, ajustada para el inventario. El plan del MPS final se muestra en la tabla 7-5. Observe que, para este artículo en particular, la política de lote por lote de una producción más suave que la política de lotes. No obstante, a este nivel no debe suavizarse a producción. Esto conduce de regreso al plan agregado. Los cuatro teléfonos distintos requieren básicamente los mismos recursos de manufactura. El suavizamiento de la producción a ese nivel mantendrá la fuerza de trabajo y otros recursos en niveles uniformes, aun cuando la producción de un artículo individual no esté nivelada.

TABLA 7-5
Plan final del MPS para la política de producción por lotes

Inventario actual = 1600	Semana							
	1	2	3	4	5	6	7	8
F_t	1000	1000	1000	1000	2000	2000	2000	2000
O_t	1200	800	300	200	100	0	0	0
I_t	400	0	0	0	0	0	0	0
MPS		**600**	**1000**	**1000**	**2000**	**2000**	**2000**	**2000**
DPP	400	0	700	800	1900	2000	2000	2000

2.3 Modelado de MPS

Aunque es fácil comprender el concepto de programa maestro de producción, no hay consenso sobre cómo modelar este problema. Aún más, la naturaleza del problema es diferente para los entornos de producción para inventario, ensamble por pedido y producción por pedido. En esta sección se muestran los modelos para el problema del programa maestro para la producción para inventario y el ensamble por pedido.

2.3.1 Modelado de producción para inventario

En la PPI se tiene un pronóstico para cada artículo final y se debe elegir el tamaño del lote para el último paso de producción (por lo general el ensamble). Así, se trata de una versión compleja del problema del tamaño del lote que se analizó en el capítulo 6. Aquí también se hace un trueque entre el costo de preparación y el costo del inventario de producto terminado. El ambiente de productos múltiples y capacidad de producción limitada aumenta la complejidad del problema. Debido a la restricción de capacidad, existe dependencia entre los tamaños de los lotes para los artículos; por lo tanto, no es probable que la solución independiente para cada artículo conduzca a una solución factible.

La formulación matemática de este problema es la siguiente:

Sea

Q_{it} = cantidad a producir del artículo i en el periodo t
I_{it} = inventario del producto i al final del periodo t ($i = 1,..., n$; $t = 1,..., T$)
D_{it} = demanda (requerimientos) del producto i en el periodo t
a_i = horas de producción por unidad del producto i
h_i = costo de mantener el inventario por unidad de producto i por periodo
$A\ i$ = costo de preparación para el producto i
$G,$ = horas de producción disponibles en el periodo t

y_{it} indica si debe incurrirse o no en el costo de preparación para el producto i en el periodo t (es decir, $Q_{ü} > 0$ implica que $y_u = 1$, y $Q_{ü} = 0$ implica que $y._t = 0$)

Una formulación de programación entera es

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{i=1}^{n}\sum_{t=1}^{T}(A_i y_{it} + h_i I_{it})$$

sujeta a

$$I_{i,t-1} + Q_{it} - I_{it} = D_{it} \qquad \text{para toda } (i, t) \qquad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{n} a_i Q_{it} \le G_t \qquad \text{para toda } t \qquad (2)$$

$$Q_{it} - y_{it}\sum_{k=1}^{T} D_{it} \le 0 \qquad \text{para toda } (i, t) \qquad (3)$$

$$Q_{it} \ge 0,\ I_{it} \ge 0,\ y_{it} = 0, 1 \qquad \text{para toda } (i, t) \qquad (4)$$

La función objetivo minimiza la suma del costo de preparación y el costo de mantener inventario, los cuales son costos relevantes para este modelo.

La primera restricción es la ecuación de balance de materiales; la segunda es la restricción de capacidad, y la tercera garantiza que la producción de un periodo a otro no excederá la demanda total acumulada. La última restricción hace todas las variables no negativas, lo que implica que no se permiten faltantes.

La restricción de capacidad (2) se puede determinar por el ensamble final o cualquier otra operación cuello de botella. Se pueden agregar al modelo características adicionales como tiempo extra, subcontratación y órdenes atrasadas, de una manera similar a los modelos de programación lineal estudiados en el capítulo 5.

Para muchos problemas del mundo real, el número de variables y restricciones "explota"; esto evita que se pueda encontrar una solución óptima. En Maes y Van Wassenhove (1986) se puede encontrar un modelo heurístico eficiente para resolver este problema.

2.3.2 Modelado de ensamble por pedido

En un entorno de EPP existen dos programas maestros: el MPS a nivel de módulos y el programa de ensamble final a nivel de artículo final. El MPS está motivado por el pronóstico, mientras que las órdenes ponen en marcha el PEF. Esto puede causar discrepancias entre los módulos producidos a partir del pronóstico y los módulos que en realidad se requieren para las órdenes de los clientes. Como resultado, se genera un inventario y de nuevo se tiene un trueque entre el costo de excedentes y el costo de faltantes. Existen dos tipos de costo por faltantes: las ventas perdidas y las órdenes atrasadas. Baker[1] propone una formulación para este problema con las siguientes suposiciones:

- Un MPS conocido y los niveles de inventario inicial determinan cuánto de cada módulo estará disponible en cada periodo para horizonte de *T* periodos.
- Las demandas de los clientes se conocen durante todo el horizonte de planeación y se per miten órdenes atrasadas.

Si se tienen *m* tipos de módulos y *n* tipos de productos, la siguiente información puede obtenerse del MPS y de la estructura del producto: Q_{kt} es la cantidad del módulo *k* producida en el periodo *t y* g_{kJ} es el número de módulos del tipo ¿requeridos para ensamblar la orden y, que incluye un tipo de producto.

Existen dos variables de decisión: I_{k_i} (inventario del módulo *k* al final del periodo *t*)y

$$y_{jt} = \begin{cases} 1 & \text{si la orden } j \text{ se ensambla y entrega en el periodo } t \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases}$$

Si hubiera pedidos múltiples para un producto dado, cada uno estaría representado por un índice *j* diferente.

Además, sean h_k el costo por periodo de mantener en inventario una unidad del módulo *k* y 7t $_{jt}$ el costo de la sanción si la orden *j* se satisface en el periodo *t.* Entonces, si la orden *j* debe entregarse en el periodo *t'(t' < t) y* se satisface en el periodo?, esta orden acumula una sanción

La suposición es que el ensamble y la entrega de una orden ocurren en el mismo periodo. Para el caso de capacidad infinita, ésta es una suposición factible. Si hay un faltante o la capacidad es limitada, la orden se entrega en un periodo *t* posterior, y se incurre en una penalización

'Adaptado de Baker (en Graves *etal.* (1993)) con el amable permiso de Elsevier Science-NL, Sara Burgerhartstraat 25,1055 KV Amsterdam, Holanda.

den $_{jt}$. Por otro lado, en caso de que se quiera evitar falta de capacidad en el periodo *t* y que una orden de manufactura *j* de un periodo anterior deba entregarse en el periodo /, se establece un costo de penalización 7t $_{Jt}$ que refleje el costo de mantener el orden. Sea

G, el número de horas de ensamble disponibles en el periodo *t* y sea *Qj*
el número de horas requeridas por la orden *j* El modelo entero mixto es

$$\text{Maximizar} \sum_{k=1}^{m}\sum_{t=1}^{L} h_k I_{kt} + \sum_{j=1}^{n}\sum_{t=1}^{L} \pi_{jt}\, y_{jt}$$

sujeta a

$$I_{kt} = I_{k,t-1} + Q_{kt} - \sum_{j=1}^{n} g_{kj}\, y_{jt} \qquad \text{para toda } (k,\ t)$$

$$\sum_{j=1}^{n} a_j y_{jt} \le G_t \qquad \text{para toda } t$$

$$\sum_{t=1}^{L} y_{jt} = 1 \qquad \text{para toda } j$$

$$I_{kt} \ge 0 \qquad y_{j,t} = 0,1 \qquad \text{para toda } j,\ k,\ t$$

Las primeras dos restricciones son las familiares ecuaciones de balance de material y la restricción de capacidad, respectivamente. La última restricción garantiza que la orden 7 se realice en sólo un periodo.

En este modelo se hace la suposición tácita de que se conoce el MPS para *T*periodos y que las órdenes sólidas se conocen para *L* periodos, donde $L < T$. Las decisiones de asignación se toman para los primeros *L* periodos y cuando llega una orden nueva, se hacen nuevas asignaciones. *L* se llama periodo de acumulación, y este parámetro ya no conducirá a mejores decisiones. De nuevo, el número de restricciones crece de manera explosiva para problemas del mundo real.

2.4 Planeación de la capacidad

Hasta ahora, el MPS no ha considerado la capacidad detallada, un elemento crucial para su implantación. La instalación de producción, constituida por centros de trabajo, máquinas, equipo de manejo de materiales, etcétera, tiene una capacidad finita. Sólo se puede ensamblar cierto número de teléfonos por semana en un¿ estación de ensamble. La capacidad se puede medir en términos de las unidades de producto por unidad de tiempo que puede producir una instalación. Otra unidad común de medida es la hora. Si el MPS pide tasas de producción más altas que las disponibles, se tiene un faltante de capacidad y el resultado será entregas tardías. Debe aumentarse la capacidad (si es posible) o bien ajustar el MPS. Por otro lado, si el MPS pide una tasa de producción menor que la capacidad instalada, se tiene capacidad ociosa. Dado que el MPS refleja la demanda del mercado, debe evitarse producir para almacenar sólo para incrementar el uso de la instalación. Es una manera muy costosa de lograr una alta utilización. Si el exceso de capacidad va a durar un plazo largo, es adecuado hacer una reducción de capacidad. La capacidad de una planta de producción, en la que el producto fluye a través de cierto número de esta-

ciones de trabajo, se determina por sus operaciones cuello de botella. Un cuello de boljella e| una operación que limita la salida.

Existen dos niveles en los que se evalúa la capacidad: el nivel del MPS y el del PRM (vea la figura 7-2). En el nivel MPS se realiza una verificación rápida de la capacidad total p&ra en contrar la factibilidad del MPS. Esta verificación puede identificar violaciones a la capacidad, pero no puede garantizar la implantación; por lo general, se realiza a nivel de los departamentos o centros de trabajo. Por esto recibe el nombre de planeación preliminar de la capacidad ¡(PPC |. Sin embargo, un programa factible del tipo del MPS no necesariamente garantiza un programa factible para el PRM. En este nivel más detallado se toman en cuenta los subensambl^s y las componentes, lo cual se refleja en el uso de máquinas u operaciones de ensamble individúale;>. Por lo tanto, aquí se realiza otra verificación de la capacidad o una planeación *detallac'a* de la capacidad, que casi siempre se etiqueta como CRP (por planeación de requerimientos de capa cidad). Los dos procesos son de naturaleza similar.

El término *planeación de la capacidad* se puede prestar a una mala interpretación). Tanjo la PPC como la CRP son herramientas de información y no de decisión. Indican qué res|tricciones de capacidad se violan, pero no proporcionan una guía para resolver el conflicto. Se usará el siguiente ejemplo para ilustrar.

Ejemplo 7-3. Planeación de la capacidad. Considere el MPS del ejemplo 7-1 para el me¿ de en|ero. En la tabla 7-6 se dan las cantidades en el tiempo para los cuatro modelos de teléfonos

TABLA 7-6
Ejemplo de capacidad

a)

	MPS			
	Semana			
	1	2	3	4
Modelo A	1000	1000	1000	1000
Modelo B		500	500	
Modelo C	1500	1500	1500	1500
Modelo D	600		600	

b)

	Carga de capacidad (min)	
	Ensamble	Inspección
Modelo A	20	2.0
Modelo B	24	2.5
Modelo C	22	2.0
Modelo D	25	2.4

c)

	Capacidad requerida (h)				
	Semana				
	1	2	3	4	Capacidad disponible por semana
Ensamble	1133	1083	1333	883	1200
Inspección	107	104	128	83	110

La producción de teléfonos requiere un centro de ensamble y una estación de inspección. La tabla 7-6¿») muestra la **lista de capacidad,** es decir, el tiempo de operación por unidad de tiempo (en minutos) requerido en cada centro de trabajo. La lista de capacidad permite convertir las cantidades en el MPS en un perfil de los requerimientos de capacidad. Los requerimientos de capacidad para cada semana se muestran en la parte *c)* de la tabla 7-6. Por ejemplo, la capacidad requerida para la semana 1 se calcula como sigue:

Ensamble: 1000 x 20 + 1500 x 22 + 600 x 25 = 68 000 min = 1133.33 h
aproximadamente 1133 h.

Inspección: 1000 x 2.0 + 1500 x 2.0 + 600 x 2.4 = 6440 min = 107.33 h
aproximadamente 107 h.

La capacidad se mide en horas y no en unidades por hora. La capacidad disponible por semana es 1200 horas para el centro de trabajo de ensamble y 110 horas para la estación de inspección. Se puede observar de inmediato que las restricciones de capacidad se violan en la semana 3 para las operaciones tanto de ensamble como de inspección. La planeación de la capacidad proporciona una señal de que alguna restricción de capacidad se ha violado, pero no da la manera de responder a este problema de capacidad.

Una respuesta es volver a programar las cantidades de ensamble. Por ejemplo, si se mueven 600 unidades de la semana 3 a la semana 4, se obtiene el perfil de carga que se muestra en la tabla 7-7. De esta manera se elimina la violación a la capacidad. Sin embargo, ni la PPC ni el CRP indican cómo hacer esto.

TABLA 7-7
Perfiles de carga

	Semana			
	1	2	3	4
Ensamble	1133	1083	1083	1133
Inspección	107	104	104	107

Como la planeación de la capacidad es sólo una herramienta de información, se considera como planeación de **capacidad infinita.** Las violaciones a la capacidad se ignoran y deben eliminarse después. Esta característica de capacidad infinita con frecuencia se cita como una debilidad de los sistemas de PRM. Es difícil superar este punto débil. La naturaleza combinatoria de este problema *NP-duro* (vea el cuadro 8-1) hace que sea complicado aplicar cualquier algoritmo de solución en situaciones de la vida real. No obstante, en los últimos años se ha progresado en este tema (capítulo 10).

Cuando no se dispone de una carga de capacidad detallada, se usa un método llamado **planeación de la capacidad usando factores globales** (PCFG). Los insumos requeridos para este método son los datos del MPS y los factores de planeación derivados de los estándares o de los datos históricos. Es común que estos factores de planeación sean las horas totales estándar de las máquinas o la mano de obra requerida para completar la fabricación (o el ensamble) del producto final. Al aplicar estos tiempos estándar al MPS se llega a una estimación de la mano de obra total requerida o las horas máquina por periodo. El siguiente paso es asignar el número total de horas a cada centro de trabajo. Esta asignación se hace usando datos históricos sobre cargas de trabajo de la planta, donde la carga para cada centro de trabajo (máquina) se expresa en porcentaje. Estos porcentajes son los factores globales usados para la planeación de la capacidad. (Se encuentran más detalles en Vollman, Berry y Whybark (1992).)

tos menores de datos. Sin embargo, ignoran los tiempos de entrega reales, lo que da como resultado que las cargas de trabajo no consideren retrasos en los distintos centros de trabajo. La planeación preliminar de la capacidad (PPC) identifica las violaciones obvias de manera que se pueden hacer ajustes antes de calcular el PRM detallado. En cualquier caso, el programa maestro debe revisarse con el fin de hacer planes factibles.

2.5 Modelado de la capacidad

En lugar de usar métodos exactos para superar la suposición tácita de capacidad infinita de la PPC y el CRP, se puede usar un método heurístico. Mientras que éste no garantiza una solución óptima, tampoco tiene el problema de la explosión combinatoria de los métodos exactos.

Un método heurístico para planeación de capacidad finita se basa en el análisis de entrada/salida (I/O) y fue desarrollado por Karni.[2] En él se considera la relación entre la capacidad y el tiempo de entrega. En el proceso de MRP estándar, el tiempo de entrega se toma como un parámetro constante ignorando los niveles de capacidad. El análisis de I/O relaciona ambos para un centro de trabajo específico. Sea

G = capacidad del centro de trabajo
$R,$ = liberación de trabajo para el centro en el periodo t
$Q,$ = producción (salida) del centro de trabajo en el periodo t
W_t = trabajo en proceso en el periodo t
$U,$ = cola en el centro de trabajo medida al principio del periodo í, antes de poner en circulación el trabajo
$L,$ = tiempo de entrega en el centro de trabajo en el periodo t

Todos los elementos anteriores, excepto $L,$, se miden en unidades comunes como horas o unidades físicas. $L,$ se mide en semanas (o meses). Por ejemplo, $R_2 = 20$ significa que la producción que se pide en la semana 2 requerirá 20 horas del centro de trabajo (o 20 unidades, dependiendo de la unidad de medida).

La producción planeada $R,$ se obtiene del proceso del MRP. La capacidad G está dada, y el resto de los elementos se obtiene a través del método heurístico. El análisis de I/O detalla el comportamiento del tiempo de entrega a través del tiempo mediante las siguientes ecuaciones:

$$Q_t = \text{mín}\{G, U_{t+1} + R_t\}$$ el nivel de producción es el mínimo del trabajo disponible o de la capacidad

$$U_t = U_{t-1} + R_t - Q_t$$ cambios en el tamaño de la cola

$$W_t = U_{t-1} + R_t = U_t + Q_t$$

$$L_t = \frac{W_t}{G}$$

Este modelo sugiere que el tiempo de entrega no es constante, sino que puede variar según los niveles de producción. Así, el modelo I/O proporciona un enfoque más realista para la representación del tiempo de entrega.

[2] Adaptado de Karni (1982) con el amable permiso de Taylor & Francis.

Este modelo tiene dos suposiciones tácitas: la tasa de producción es constante para cualquier nivel positivo de trabajo en proceso y el tiempo real de producción es pequeño comparado con el periodo; es decir, mientras exista capacidad, la orden que se pide en este periodo se completa en este periodo. Conforme los periodos sean más pequeños, el tiempo de procesamiento y la transferencia de materiales pueden invalidar esta suposición.

El modelo I/O se puede implantar usando una hoja de cálculo. En ella se pueden realizar dos tipos de análisis: el análisis del tiempo de entrega para *G* y *R*, dados, y el análisis de capacidad para un tiempo de entrega dado (digamos por el MRP). Para demostrar estos dos análisis se usa el siguiente ejemplo en hoja de cálculo.

Ejemplo 7-4. Modelado de la capacidad. En la instalación de fabricación de teléfonos, la operación final es empaque; en ella, cada teléfono se coloca en una caja de cartón. Esta operación es manual y se realiza en las "mesas de empaque". Cada estación de trabajo tiene una capacidad de 36 horas. El formato de hoja de cálculo descrito en la tabla 7-8 presenta los cálculos del tiempo de entrega. Los elementos para *G* están en horas por semana; el tiempo de entrega en semanas, y los demás en horas.

Se puede observar que el tiempo de entrega no es constante, fluctúa entre 0.83 y 1.67 semanas. Si el tiempo de entrega de la producción especificado en el MRP es 2 semanas, la capacidad anterior es adecuada. Aún más, investigando entre los valores potenciales de la capacidad, se encuentra que 2 semanas de tiempo de entrega se pueden lograr con 32 horas-semana. Mejor aún, ese tiempo de entrega se puede reducir a 1.5 semanas.

TABLA 7-8
Análisis de I/O

	Periodo						
	0	1	2	3	4	5	6
G		36	36	36	36	36	36
R_t		20	30	60	20	40	40
Q_t		30	30	36	36	36	36
U_t	10	0	0	24	8	12	16
W_t		30	30	60	44	48	52
L_t		0.83	0.83	1.67	1.22	1.33	1.44

SECCIÓN 2 EJERCICIOS

7.3. Describa la diferencia entre los pronósticos de demanda y el MPS de los marcadores de la Julo Company.

7.4. Dé un ejemplo de un proceso de manufactura cuya estructura lleve a:

a) un entorno de PPI
b) un entorno de PPP
c) un entorno de EPP

7.5. Azure Mills, Inc., produce pinturas de óleo para artistas en cientos de colores y tamaños de contenedores. Compran pigmentos de colores primarios a granel. Con ellos, mezclan y empacan sus artículos finales. ¿Qué ambiente producto-mercado sería el más adecuado para el MPS de Azure Mills?

7.6. ¿Qué insumos se requieren para derivar un plan para el MPS?

7.7. Dados los pronósticos, las órdenes de los clientes y el inventario disponible mostrado pai a un p roducto en un entorno de EPP, derive el MPS para

a) producción lote por lote
b) producción en lotes donde el tamaño del lote es 8000

		Semana					
Inventario actual	= 7500	1	2	3	4	5	6
F, O,		6000	6000	5600	5000	6000 0	5000 0
		4600	4000	3500	500		

7.8. Agregue los valores de DPP para el plan MPS del problema 7.7.
7.9. Para los datos del problema 7.7, desarrolle el MPS si la demanda del producto se cumplej en un En torno de PPP.
7.10. Formule matemáticamente el problema del MPS usando los costos, requerimientos y tiejmpos tiue se muestran en la tabla con dos productos, para un horizonte de planeación de tres serr anas, con 1200 horas por semana. Éste es un entorno PPI.

	Demanda (unidades)					**Costo** ($)	
Semana	1	2	3	actual	Horas/unidad	Prep.	Mant.
Pl	200	250	150	100	2.50	3.75	0.65
P2	560	590	700	50	1.20	5.50	0.23

7.11. Dados los siguientes datos para un ambiente de EPP, formule matemáticamente el problema del MPS. Existen tres módulos que se ensamblan para producir dos productos. En este momento hay seis órdenes que cumplir durante los próximos tres periodos. Se dispone de 112 horas de tiempo de producción en cada periodo.

Órdenes de clientes			
Orden i *j*	**Producto** *i*	**Cantidad** *Oí*	**Semana de** entrega *t*
1	1	15	1
2	2	30	1
3	1	20	2
4	2	30	2
5	1	10	3
6	2	20	3

	k		
i	1	2	3
1	3	2	1
2	1	1	1

q_{ti} - número de módulos tipo *k* requeridos para ensamblar el producto *i*

g_{kj}							
	j						
k	1	2	3	4	5	6	Total
1	45	30	60	30	30	20	215
2	30	30	40	30	20	20	170
3	15	60	20	60	10	40	205

g_{kj} = número de módulos tipo k requeridos para la orden j

π_{jt}						
	j					
k	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0.45	0.30	0.45	0.30
2	1	1	0	0	0.90	0.60
3	2	2	1	1	0	0

π_{jt} = costo de penalización si la orden se satisface en el periodo t

h_k		
h_1	h_2	h_3
0.120	0.010	0.085

h_k = costo de mantener el módulo k por periodo por unidad

a_j					
a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
45	66	60	66	30	44

a_j = horas de ensamble por orden j

7.12. ¿Qué es un cuello de botella y qué significado tiene una operación de cuello de botella en una planta de producción?

7.13. ¿Cuál es la diferencia entre la planeación preliminar de la capacidad y la planeación detallada de la capacidad? ¿Cuál es la limitación más importante de estos procedimientos?

7.14. Pell Sons Boats fabrica tres tipos de barcos de vela. Su operación de ensamble final comprende tres centros de trabajo: pintura, instalación del mástil y encordado. Dado el MPS y la capacidad para PBS, Inc. que se muestra en las tablas que siguen, establezca un perfil de la capacidad. Si es necesario, sugiera un MPS alternativo que sea factible.

MPS (unidades)								
Semana	1	2	3	4	5	6	7	8
Barco 1	94	93	42	33	73	87	71	98
Barco 2	65	20	48	57	77	37	74	40
Barco 3	71	53	56	22	91	79	93	66

Uso de la capacidad (unidades)			
	Pintura	Mástil	Cuerda
Barco 1	43	22	17
Barco 2	57	30	23
Barco 3	90	50	41

7.15. Los siguientes datos representan las órdenes planeadas que se mandan a un centro de trabajo de ensamble, que tiene una capacidad de 475 horas por semana. Utilice el método de análisib de I/O de Karni (1982) para analizar los tiempos de entrega, suponiendo que U_o = 0.

	Semana					
	1	2	3	4	5	6
R_t	379	508	248	295	351	227

7.16. Utilice los datos del problema 7.15 para determinar la capacidad adicional que se requerirá para lograr un tiempo de entrega de 0.5 semanas para ese volumen de trabajo.

7.17. Rock Huggers, Inc. fabrica cuatro tipos de zapatos deportivos: Chewy, Tally, Ammy y Grandy. La persona que planea la producción para RHI, Blick Carry, recibió el siguiente pronóstico del de
partamento de ventas:

Pronósticos, en pares y 1000

	Septiembre				Octubre			
	1	2	3	4	5	6	7	8
Chewy	98	94	93	87	73	71	42	33
Tally	74	71	57	33	28	18	12	9
Ammy	50	48	21	13	11	9	4	2
Grandy	24	24	21	18	17	16	16	8

Blick recibió también los siguientes datos que representan las órdenes de los clientes park esas Remanas:

Órdenes de clientes, en pares < 1000

	Septiembre				Octubre			
	1	2	3	4	5	6	7	8
Chewy	93	93	78	71	61	27	11	3
Tally	63	61	59	37	24	15	11	10
Ammy	44	34	19	18	17	14	8	7
Grandy	30	29	24	14	7	5	4	1

Las cantidades en inventario de los modelos Chewy, Tally, Ammy y Grandy son 129 000, 108 000,79 000 y 43 000, respectivamente. Los departamentos de producción quieren que Blick programe en tamaños de lotes que sean múltiplos de 100 000. ¿Cuáles serían las cantidades del MPS de Blick para los cuatro tipos de zapatos?

7.18.

Inventario actual = 890	Semana						
	1	2	3	4	5	6	7
F_t							
O_t	973	929	746	574	538	181	120
I_t	917	988	169	449	836	296	897
MPS	1000	1000	0	1000	1000	0	1000

7.19. Un buen cliente de Rock Huggers, Inc. (vea el ejercicio 7.17) llama a la compañía en la semana 1 para hacer un pedido urgente de 14 000 pares de Chewys y 25 000 pares de Grandys. ¿En qué tiempo puede esperar el cliente recibir los zapatos?

7.20. ¿Por qué no se usan las cantidades en inventarío para calcular las cifras de disponible para prome sa después del primer periodo?

7.21. Trabaje de nuevo en los cálculos para Rock Huggers, Inc. usando una política de lote por lote. ¿Qué plan es el mejor y por qué?

7.22. Encuentre una solución factible para el modelo del MPS que se formuló en el ejercicio 7.10.

7.23. Establezca la relación matemática entre Q_{kt} y g_{kj} en el modelo del MPS para entornos de EPP.

3 PLANEACIÓN DE REQUERIMIENTOS DE MATERIALES

3.1 Panorama general

Durante las dos últimas décadas, muchas compañías industriales han cambiado sus sistemas de inventarios, y en lugar de manejarlos como sistemas de punto de reorden (enfoque de demanda independiente), ahora los manejan como sistemas de MRP (enfoque de demanda dependiente). La tecnología de las computadoras lo ha hecho posible. Este enfoque se desarrolló a principios de los 70 y se atribuye a varios expertos, entre ellos a Orlicky y Wight (vea el capítulo 10).

Un MRP es una manera adecuada de considerar productos complejos. Por lo general, se toma en cuenta el ensamble de varias componentes y subensambles que forman un producto completo. Igual que para el MPS, el tiempo se ve como intervalos discretos o baldes de tiempo. El principal objetivo del MRP es determinar los **requerimientos** —la demanda discreta de cada componente en cada balde de tiempo—. Estos requerimientos se usan para generar la información necesaria para la compra correcta de materiales o para la planta de producción, tomando las cifras de los tiempos del MPS y generando un conjunto resultante de componentes o de requerimientos de materiales espaciados en el tiempo. Sigue a este procedimiento una planeación detallada de la capacidad (CRP). Después se analiza cómo se puede generar un MRP.

3.2 Esencia del MRP

El principal objetivo de los sistemas MRP es generar los requerimientos de componentes y materia prima por etapas. Éstos constituyen la salida del sistema. En esta sección se estudian los insumos requeridos por el sistema y después se profundiza sobre los resultados obtenidos.

Los tres insumos más importantes de un sistema MRP son el **programa maestro de** piío-**ducción,** los **registros del estado del inventario y** la **lista de materiales** (estructura del pioducto). Se hace hincapié en la importancia del MPS como insumo para el MRP. Es el insumo primordial del sistema MRP, ya que el objetivo principal de este sistema es tomar los irequerimientos para cada etapa del producto terminado y traducirlos en requerimientos de coi ipone^ntes individuales. Con frecuencia se usan dos insumos adicionales para generar la salida del sistema: las órdenes de componentes que se originan en fuentes externas a la plañía, y los pronósticos de los artículos sujetos a demanda independiente (como material de mantenimiento o material de soldadura).

Los **registros del estado del inventario** contienen el estado de todos los artículos] en el in ventario. El registro se mantiene actualizado con todas las transacciones del inventario —re cepción, retiros o asignaciones de un artículo de o para el inventario—. Si se registra *pn* fortna adecuada, cada transacción se logra la integridad del archivo del inventario.

Los registros de inventario incluyen también factores de planeación, que por lo cqmún son tiempo de entrega del artículo, inventario de seguridad, tamaños de lote, desperdicio] permiti do, etcétera. Se necesitan para señalar el tamaño y los tiempos de las órdenes de corhpra pla neadas. El usuario del sistema determina los factores de planeación según la política de inven tarios (inventario de seguridad, tamaño del lote), o de acuerdo con restricciones éxógetias (tiempo de entrega de proveedores).

La **lista de materiales (LM)** en ocasiones se llama **estructura del producto.** Sin embargo, existe una diferencia sutil. La estructura del producto es un diagrama que muestra la secuencia en la que se fabrican y ensamblan la materia prima, las partes que se compran / los subensambles para formar un artículo final. El archivo de computadora de la estructura del producto se llama lista de materiales. En la figura 7-4 se muestra una estructura de un producto genérico. Este ejemplo específico se refiere a un producto con cuatro niveles; se dice que tiene

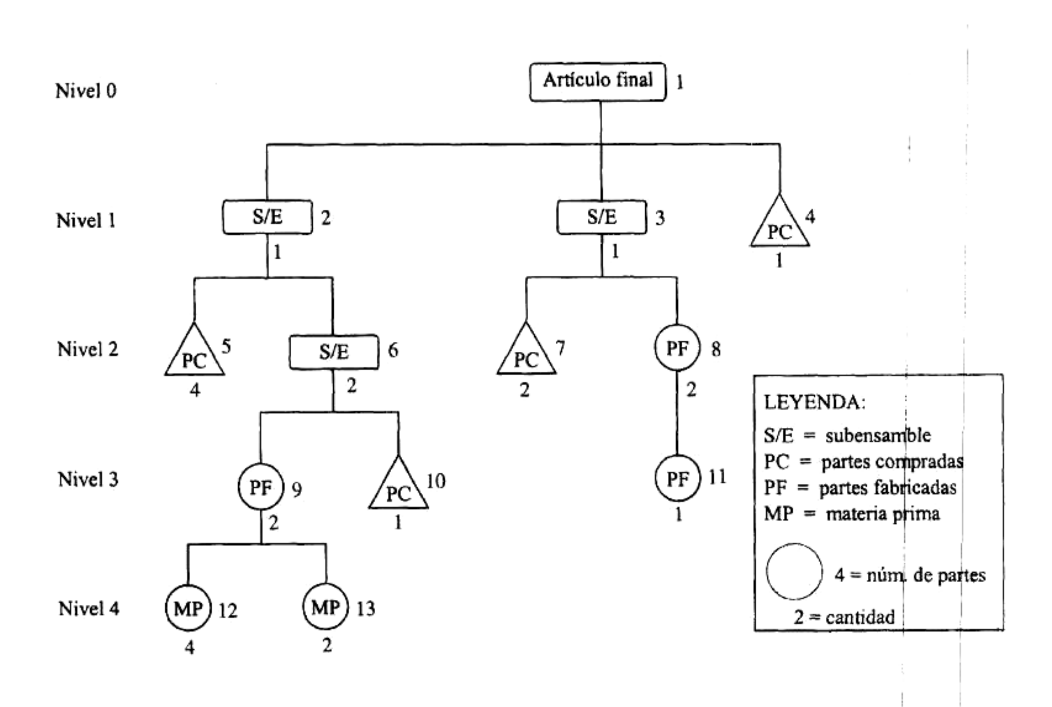


FIGURA 7-4
Diagrama de estructura de un producto genérico

Lista de materiales indentada

Revisión WU | Ruta de revisión | Lista de revisión | Agregar estruct. | Alto

LISTA IND. REVISADA

Informe impreso | Ambos | SALIDA

Número de parte 638390015E

Nivel de bidentado	Numero de parte	CC	Cant. por	UM	LL	Descripción	
)	638390015E			Pza.	4	CABLE L. RFI ALMENDRA TEL. W/O	No
1	5110130022		1.0000	Pza.	10	POLIETILENO EN BOLSA 270 X 400	No
1	5110130116		1.0000	Pza.	6	BOLSA POLIETILENO	No
1	6383100302		1.0000	Pza.	5	HOJA INSTRUCCIONES OPERACIÓN	No
1	6383101252		1.0000	Pza.	5	CAJA EMPAQUE TEL. COLOR	No
1	638390207E		1.0000	Pza.	5	ETIQ. EMPAQ. ALMENDRA TEL. 547/1	No
1	638390210E		1.0000	Pza.	5	ETIQ. COLOR ALMENDRA TEL. 547/1	No
1	638391015E		1.0000	Pza.	5	TEL. 547-1 R-in ENS. ALMENDRA	Sí
2	2543824061		1.0000	Pza.	6	CORDÓN AURIC. RAL 1013,12 FT, 4P	No
2	6383102141		1.0000	Pza.	6	CONDUC. A DTMF/PULSO SW	No
2	638390115E		1.0000	Pza.	6	TEL. 547-1 R-in ENS. SIN H.S. ALM.	Sí
3	6383113001		1.0000	Pza.	7	BASE ENSAMBLE	Sí
4	6383113015		1.0000	Pza.	8	BASE PLATO W/TIMBRE TRANSDUC.	Sí
5	6383113032		1.0000	Pza.	9	UNIDAD TIMBRE	No
5	6383113046		1.0000	Pza.	9	BASE PARA TELÉFONO	No
6	2526500319		.1075	KG	10	CYCOLAC TCA 333210 GRIS OXFORD	No
6	5110120081		.0205	Pza.	10	EMPAQUE CUBIERTA INF. SUP.	No
6	5110130022		.5000	Pza.	10	BOLSA POLIETILENO 270 X 400	No
5	6383113050		.0012	LT	9	PEGAMENTO EPOXY	No
4	6383113029		4.0000	Pza.	8	PIE	No
3	6383113094		1.0000	Pza.	7	PERILLA SELECCIÓN	No
3	6383113109		4.0000	Pza.	7	TORNILLO CONEXIÓN (BASE)	No
3	6383113206		1.0000	Pza.	7	PESO, GRANDE	No
3	6383113210		1.0000	Pza.	7	PESO, CHICO	No
3	6383113223		1.0000	Pza.	7	RESORTE COMPRESIÓN	No
4	3883113222		1.0000	Pza.	8	CHAVETA DE PRESIÓN	No
3	6383113237		1.0000	Pza.	7	CONTACTO DE LÍNEA	No
4	2526500291		.0050	KG	8		No
3	6383113241		1.0000	Pza.	7	INTERRUPTOR ALTERACIÓN	No
4	2526500291		.0030	KG	8		No
3	638313010E		1.0000	Pza.	7	TARJETA ENS. TEL. 547-1 R-in	Sí
4	638311610E		1.0000	Pza.	8	TARJETA ENS. TEL. 547-1 E-6	No
5	2250428014		1.0000	Pza.	9	PELÍCULA METÁLICA 10M 1% 1/4W	No
5	2272400325		5.0000	Pza.	9	DIODO AA CAMBIO 1N4148	No
5	2274122220		3.0000	Pza.	9	TRANSISTOR NPM PN2222A, T+R	No
5	2543906565		1.0000	Pza.	9	CINTA CONECTOR 10 CONT. MACHO	No
5	2543912403		1.0000	Pza.	9	JACK ENS. (AURIC), 4 PIN, NEGRO	No
5	2543912417		1.0000	Pza.	9	JACK ENS. (LÍNEA), 4 PIN/6 BLANCO	No
5	2545011136		1.0000	Pza.	9	INTERRUP. RESBALÓN DPDT, P/PBC	No
5	2545012121		1.0000	Pza.	9	INTERRUP. RESBALÓN P/SEÑAL	No
5	2550230331		1.0000	Pza.	9	PELÍC. METÁLICA 33.2 OHM 1% 1/2W	No
5	2550230473		1.0000	Pza.	9	PELÍC. METÁLICA 47.5 OHM 1% 1/2W	No
5	2550415587		1.0000	Pza.	9	PELÍC. METÁLICA 39.2K 1% 1/8W	No
5	2551312103		2.0000	Pza.	9	PELÍC. CARB. 1K 5% 1/8W PELÍC.	No
5	2551312201		1.0000	Pza.	9	CARB. 2K 5% 0.125W PELÍC. CARB.	No
5	2551312360		1.0000	Pza.	9	3.6K 5% 1/8W PELÍC. CARB. 3.57K 1%	Sí
6	2550414543		1.0000	Pza.	10	1/8W	No

FIGURA 7-5

Lista de materiales indentada (cortesía de Telrad Telecommunications and Electronic Industry Ltd, Lod, Israel)

cuatro niveles de profundidad. Entre más niveles tenga la estructura de un producto, más complejo será —el número de niveles puede ser más de diez—. Cada elemento de la estri ctura del producto tiene un número y es costumbre mostrar las cantidades necesarias de cada uno pani un artículo final. En algunos casos se incluye el tiempo de producción para cada nivel de la estructura. De esta manera, para cada cantidad de productos terminados, es posible obtener los requerimientos **por etapas** para cada nivel.

Normalmente se hace referencia a la jerarquía de la estructura del producto como Una **relación padre-hijo.** Cada elemento tiene un padre —el elemento arriba de él— y un hijo —el de mento abajo de él—. Un artículo final sólo tiene hijos y la materia prima (MP); las pactes com pradas (PC) sólo tienen padres.

La figura 7-5 contiene una sección de una lista de materiales de un teléfono de ejscritofio. Observe que se muestran los niveles de la estructura del producto, por lo que se llam^ **lista^** de **materiales indentada.**

La salida más importante de un sistema MRP es el conjunto de **órdenes planead as** que **se distribuyen.** Éstas son de dos tipos, órdenes de compra y órdenes de trabajo. Las **órdenes de compra** son cantidades de MP y PC que deben comprarse y los tiempos de disponibilidad. De acuerdo con esto, se emitirá una orden de compra el día que corresponde a la fecha ds entrega menos el tiempo de entrega del proveedor. Las **órdenes de trabajo** son cantidades de MP y S/E que deben fabricarse **y** los tiempos de sus entregas. Por lo tanto, la orden de trabaje se emite el día que corresponde a esta fecha de entrega menos el tiempo de fabricación. La óidenes de compra constituyen el **plan de compras,** mientras que las órdenes de trabajo genera a el **plan de producción** para la planta. A continuación se analizará la lógica para generar esta s dos sa lidas.

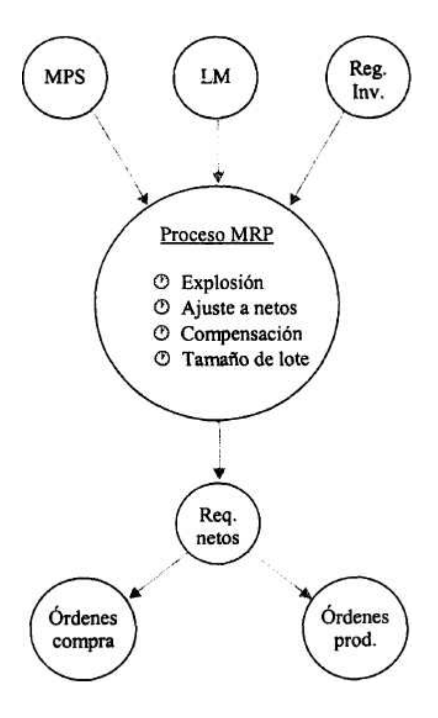


FIGURA7-6
Proceso MRP

3.3 Proceso MRP

La esencia de un sistema MRP es el proceso que transforma el insumo en la salida. La salida de este proceso consiste en los **requerimientos netos.** Éstos forman la base para determinar las órdenes de compra y de trabajo. La transformación de insumos en salidas o productos se hace en forma sistemática, siguiendo una serie de pasos llamados **explosión, ajuste a netos, compensación y tamaño del lote** (vea la figura 7-6).

En el **proceso de explosión** se simula el desensamble del producto final en sus componentes. Con las cantidades del MPS y la información de la lista de materiales, se desciende a través de la estructura del producto y para cada padre se evalúa la cantidad de hijos requerida. Esto da los requerimientos netos para cada elemento de la lista de materiales. Este proceso se ilustra con el siguiente ejemplo.

Ejemplo 7-5. El proceso de explosión. Considere el diagrama de estructura del producto genérico de la figura 7-4. La figura 7-7 muestra la rama izquierda del diagrama, junto con las cantidades requeridas en cada nivel. Para simplificar, suponga que los tiempos de entrega son 0. Suponga que los requerimientos del MPS de artículos finales son 100 unidades. El proceso de explosión se muestra en la figura 7-9. Las cantidades en cada nivel (padre) son los requerimientos para el siguiente (hijos). Por ejemplo, en el nivel 3 se necesitan 400 unidades del artículo 9 que tiene dos hijos —12 y 13—. Entonces los requerimientos en conjunto son 1600 para el artículo 12 y 800 para el 13.

Durante el proceso de adquisiciones se ajustan los requerimientos en conjunto para tomar en cuenta el inventario disponible o la cantidad ordenada. Así, los requerimientos netos son

Requerimientos netos = requerimientos en conjunto - inventario disponible - cantidad ord.

Este ajuste se hace en todos los niveles de la lista de materiales y para cada balde de tiempo. En otras palabras, en cada nivel de la lista de materiales, los requerimientos en conjunto se ajustan para obtener los netos antes de hacer la explosión de los requerimientos para el siguiente nivel. Si no hay *inventario disponible* o *cantidad ordenada* entonces, los requerimientos netos son iguales a los requerimientos en conjunto.

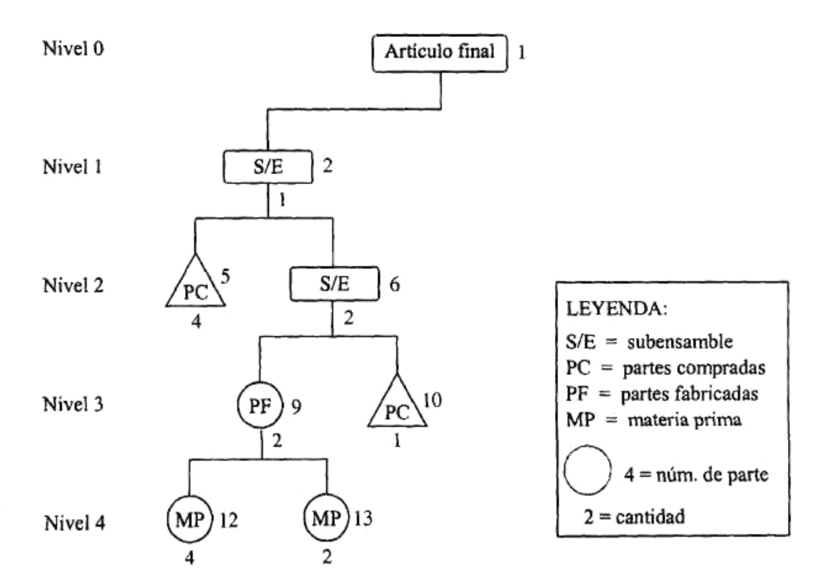


FIGURA 7-7
Segmento del diagrama de estructura de un producto genérico

TABLA 7-9
Proceso de explosión

	Artículo núm.	Requerimientos en conjunto
Nivel 0 (MPS)	1	100
Nivel 1	2	100
Nivel 2		400
	5	200
	6	
Nivel 3		400
	9	
	10	200
Nivel 4	12	1600
	13	800

Para presentar el proceso de explosión y el ajuste a netos, junto con los tiempos de las etapas, se usa una forma tabular que recibe el nombre de **registro de MRP.** Su estructura es similar a la del MPS pero sus elementos son diferentes. Se usa la fabricación de un teléfc no para ejemplificar la construcción de un registro de MRP.

Ejemplo 7-6. Registro MRP: requerimientos netos. El diagrama de la estructura del producto para el teléfono de botones para mesa (modelo A) se muestra en la figura 7-8. El MPS se pr ssenta en la tabla 7-10. (Vea también la tabla 7-5.) .Si se supone que no hay inventario disponible de teléfono (parte 1), el MPS anterior contiene también los requerimientos brutos del ensamble del auricular (parte 11). Las cantidades de la parte 11 deben estar disponibles al principio de cada serrana, para cumplir con el programa de producción a nivel 0. Se trata de los primeros elementos del registro MRP que se muestra en la tabla 7-11. El ensamble final tiene una base continua y no por lot ;s, de i nanera que se ignora el tiempo de entrega entre el nivel 0 y el nivel 1.

El segundo renglón del registro MRP proporciona las recepciones programadas. Ésta;; constituyen los materiales que se espera que lleguen al principio de la semana debidos a órdenes de compra o de producción que se distribuyeron antes, pero que todavía no se reciben por el tiempo de entrega del proveedor o por el tiempo de producción. El siguiente renglón muestra el balance del inventario proyectado (PIB) al final de cada semana. El inventario inicial se encuentra bajo el título *actu il* y se obtiene del registro de la situación del inventario. Los requerimientos netos se muestran er el último renglón.

El proceso para obtener los netos va de la primera semana a las siguientes. Se dan lo¡ s cálculos para las semanas 2, 3 y 4.

TABLA 7-10
MPS para un teléfono de botones

	Semana							
	1	2	3	4	5	6	7	8
MPS		600	1000	1000	2000	2000	2000	2000

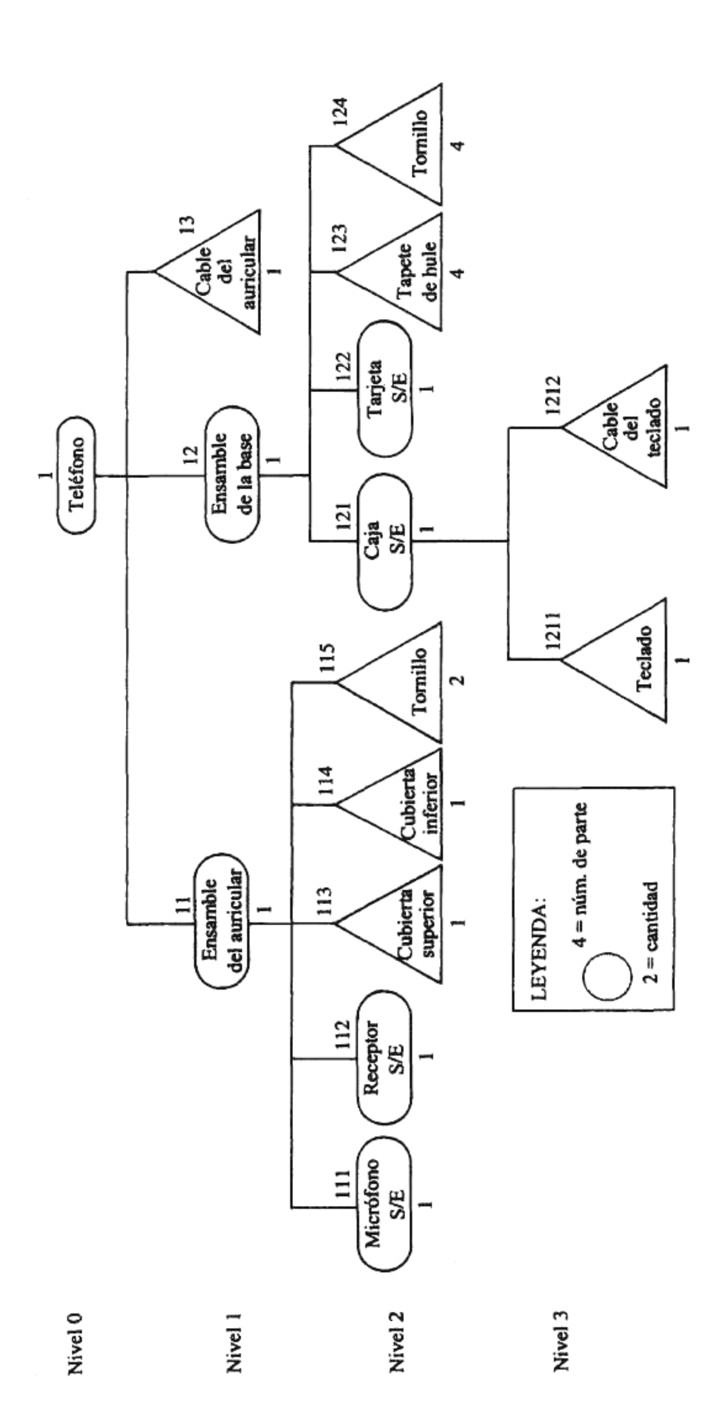


Diagrama de estructura de producto para un teléfono de botones (simpliñcado)

TABLA 7-11
Requerimientos netos para la parte

	Semana								
	Actual	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Requerimientos en conjunto			600	1000	1000	2000	2000	2000	2000
Recepciones programadas		400	700	200	0	0	0	0	0
Balance de inventario proyectado	1200	1600	1700	900	0	0	0	0	0
Requerimientos netos					100	2000	2000	2000	12000

(Requerimientos netos)$_2$ = 600 - (1600 + 700) = -1700
= requerimientos en conjunto al principio de la semana 2
- {(PIB al final de la semana 1)
+ (recepciones programadas para el principio de la semarja 2)}

El valor negativo significa que el requerimiento neto al principio de la semana es 0. El balance de inventario proyectado al final de la semana 2 es 1700.

(Requerimientos netos)$_3$ = 1000 - (1700 + 200) = -900
(Requerimiento neto) = 0, PIB = 900)
(Requerimientos netos)$_4$ = 1000 - 900 =100

Los últimos dos pasos en el proceso MRP son la compensación y el tamaño del lojte. En la **compensación** se determinan los tiempos de distribución de las órdenes. Con el fin dejcumplir con los requerimientos netos, una orden se compensa con el tiempo de producción o de; entrega del proveedor. Así, en la tabla 7-11, si el tiempo de producción es 2 semanas, en la semana 2 debe pasarse la orden a la planta para cumplir los requerimientos netos de la semana 4.

El **tamaño del lote** es el paso en el que se establece la cantidad que debe comprarle o producirse. Se pueden usar los métodos de tamaño del lote estudiados en el capítulo 6. Se muestra la implantación de estos dos pasos en el siguiente ejemplo, en el que se completa el regispro **MRP.**

Ejemplo 7-7. Registro MRP completo. Se continúa con el ejemplo 7-6 para terminar el registro MRP (tabla 7-12). Existen dos elementos nuevos en el registro MRP: las recepciones planeadas la distribución de órdenes. Las *recepciones planeadas* muestran los tiempos de las nuevas órdenes jie-cesarias para cubrir los requerimientos netos. La *liberación de órdenes planeadas* compensa las recepciones planeadas con el tiempo de entrega adecuado. La cantidad en ambos es el tamañjo del lpte seleccionado.

Suponga que el tamaño del lote para la parte 11 es 3000 y que el tiempo de producción es dos semanas. La primera recepción programada se requiere al principio de la semana 4, de manera que la distribución planeada de la orden será dos semanas antes, es decir, en la semana 2.

La primera recepción planeada cubrirá los requerimientos netos de las semanas 4 y 5, pero no son suficientes para cubrir la semana 6. Por lo tanto, se distribuye una nueva orden en la senjiana 4.

TABLA 7-12
Registro MRP para la parle 11

	Semana								
	Actual	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Requerimientos en conjunto			600	1000	1000	2000	2000	2000	2000
Recepciones programadas		400	700	200				0	0
Balance de inventario proyectado*	1200	1600	1700	900	2900	900	1900	2900	900
Requerimientos netos					100	2000	2000	2000	2000
Recepciones planeadas					3000		3000	3000	
Liberación de órdenes planeadas			3000		3000	3000			

* Balance de inventario proyectado ajustado según las recepciones programadas.

Debido a las recepciones programadas, el inventario disponible proyectado ya no es cero. Al final de la semana 4, el inventario proyectado será de 3000 - 100 = 2900; al final de la semana 5 es 2900 - 2000 = 900, y al final de la semana 6 es 900 + 3000 - 2000 = 1900. Si ha de mantenerse un inventario de seguridad, el inventario disponible proyectado no debe agotarse a menos del inventario de seguridad.

Existe una diferencia importante entre las recepciones programadas, las recepciones planeadas y la liberación de las órdenes planeadas. Las recepciones programadas son órdenes que ya se emitieron y que se encuentran en la tubería de abastecimiento. Las otras son órdenes en el papel. Si se requiere un cambio en las órdenes debido a un cambio en el MPS, es más fácil cambiar las recepciones planeadas que las recepciones programadas.

Se recapitula esta sección mostrando el flujo del proceso MRP (figura 7-9) y se continúa en la siguiente sección con la explosión en niveles múltiples y los cálculos del MRP.

3.4 Explosión de multiniveles

En un proceso de explosión MRP completo, se genera el registro MRP para cada componente del diagrama de estructura del producto. Éste es un proceso en cascada, donde los requerimientos netos de un nivel explotan en los requerimientos en conjunto del siguiente nivel. Se ilustra este proceso con el teléfono de botones (según el diagrama de estructura del producto de la figura 7-8). Para que la presentación sea más clara, se muestra sólo una explosión parcial usando sólo parte de las componentes de la estructura del producto. La información para la explosión parcial está dada en la tabla 7-13. Los dos últimos artículos se compran; sin embargo, la estructura del registro MRP es la misma para todas las partes. Se hacen las siguientes suposiciones:

El tiempo de entrega de la compra o el tiempo de producción es una semana.

La política del tamaño de lote es *lote por lote* excepto para la parte 12, que tiene un tamaño de lote fijo de 3000.

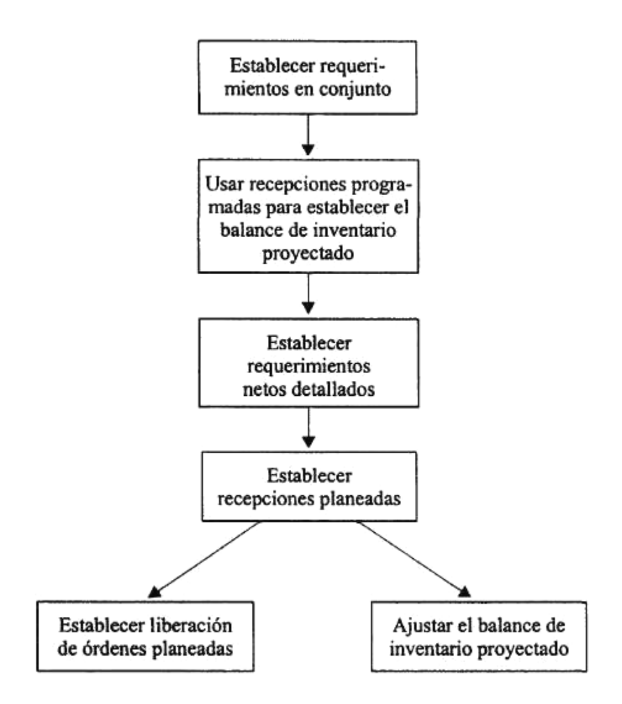


FIGURA 7-9
Flujo del proceso MRP

Los requerimientos en conjunto para la parte 12 son los mismos que los del teléfono terminado; esto es, no hay inventario de producto terminado.
El ensamble final es continuo y no por lotes, así que se puede ignorar el tiempo de entrega entre el nivel 0 y el nivel 1.
Las cantidades de recepciones programadas y el inventario disponible actual están dados como se muestra.

El proceso de explosión se muestra en la tabla 7-14. Los requerimientos en conjunto de la parte 12 son los mismos que para el MPS del producto A (tabla 7-5). Se da seguimiento a los requerimientos en conjunto de 2000 unidades para la parte 12 en la semana 7.

Los requerimientos netos son los mismos que los requerimientos en conjunto, ya que el balance de inventario no ajustado es 0. Por lo tanto, se requiere una recepción planeada de 3000. Al final de la semana 6 el balance de inventario proyectado es 1400, de manera que el balance al final de la semana 7 es 1400 + 3000 - 2000 = 2400.

TABLA 7-13
Datos de la estructura del producto

Número de parte	Descripción	Cantidad requerida por teléfono
12	Base del ensamble	1
121	Caja S/E	1
123	Tapete de hule	4
1211	Teclado	1

TABLA 7-14
Explosión MRP completa

Nivel			Semana								
			Actual	1	2	3	4	5	6	7	8
	12	**Ensamble de la base:**									
		Requerimientos en conjunto			600	1000	1000	2000	2000	*2000*	2000
		Recepciones programadas		400	400	400					
1		Balance de inventario proyectado	800	1200	1000	400	**2400**	**400**	**1400**	**2400**	**400**
		Requerimientos netos					600	2000	2000	2000	2000
		Recepciones planeadas					3000		3000	3000	
		Liberación de órdenes planeadas				3000		3000	3000		
	121	**Caja S/E:**				× 1		× 1	× 1		
		Requerimientos en conjunto				3000		3000	3000		
		Recepciones programadas				× 4		× 4	× 4		
2		Balance de inventario proyectado	500	500	500						
		Requerimientos netos				2500		3000	3000		
		Recepciones planeadas				2500		3000	3000		
		Liberación de órdenes planeadas			2500		3000	3000			
	123	**Tapete de hule:**									
		Requerimientos en conjunto			× 1	12 000		12 000	12 000		
		Recepciones programadas			10 000		× 1	× 1			
3		Balance de inventario proyectado	15 000	15 000	25 000	13 000	13 000	1000			
		Requerimientos netos							11 000		
		Recepciones planeadas							11 000		
		Liberación de órdenes planeadas						11 000			
	1211	**Teclado:**									
		Requerimientos en conjunto			2500		3000	3000			
		Recepciones programadas		1500							
3		Balance de inventario proyectado	1200	2700	200	200					
		Requerimientos netos					2800	3000			
		Recepciones planeadas					2800	3000			
		Liberación de órdenes planeadas				2800	3000				

Leyenda: Los números en negritas denotan el balance de inventario proyectado con ajuste por recepciones planeadas.
__ denota datos iniciales dados.

Debido al tiempo de entrega de una semana, la liberación de órdenes planeada es para la semana 6; explota en un requerimiento en conjunto de 3000 en la semana 6 para la parte 121 y 12 000 para la parte 123 (vea el diagrama de estructura del producto en la figura 7-10). El resto del proceso de explosión se realiza igual. Se sugiere al estudiante continuarlo.

3.5 Métodos de actualización del MRP

El método de cálculo se realiza en un entorno estático: para un MPS dado se llevan a cabo el proceso de explosión y los cálculos necesarios del MRP. Sin embargo, los sistemas MRP operan en un ambiente dinámico, en el que cambian tanto los pronósticos (y por ende el MPS) como las estructuras de producto, y en el que las entregas llegan tarde y los tiempos de producción varían. La solución estática se convierte en inválida y debe desarrollarse un proceso actualizado. Este proceso se puede hacer de dos maneras: el **método de regeneración y** el **método del cambio neto.**

En el **método de regeneración** se vuelve a calcular todo el plan de materiales, con base en el MPS actualizado, las entregas reales, el inventario actualizado, etcétera. Cada registro por artículo se calcula de nuevo por completo.

El **método del cambio neto** vuelve a calcular los requerimientos sólo para aquellos artículos afectados por el cambio, es decir, se realiza una explosión parcial. Más aún, sólo se registra lo que se agregó o eliminó del programa maestro.

La implantación del método del cambio neto es rápida y requiere relativamente poco tiempo de computadora. Se realiza cada día o cada semana. Su mayor desventaja consiste en que es imposible depurar una planeación de requerimientos inexacta, por lo que los errores se propagan.

Esta desventaja se elimina en el método de regeneración, ya que todos los requerimientos planeados se generan desde el principio; pero la implantación del método de regeneración es más complicada y requiere tiempos de computación relativamente largos. Por supuesto, en un entorno muy dinámico, los registros MRP se convierten en obsoletos con mucha rapidez.

Ambos métodos están disponibles y se aplican junto con el software actual. La regeneración se ejecuta una o dos veces al mes y, entre regeneraciones los registros se actualizan usando el método de cambio neto.

Ejemplo 7-8. Método de cambio neto. Considere el MPS del ejemplo 7-1. La tabla 7-15 proporciona los datos para el mes de febrero. Suponga que las órdenes adicionales para las semanas 7 y 8 fueron aceptadas y algunas fueron canceladas, para todos los modelos, lo que da como resultado el

TABLA 7-15
MPS para febrero

Producto	Febrero			
	Semana			
	5	6	7	8
Modelo A	2000	2000	2000	2000
Modelo B	350	—	—	350
Modelo C	1000	—	1000	1000
Modelo D	—	300	200	—

TABLA 7-16
MPS actualizado

Producto	Febrero			
	Semana			
	5	6	7	8
Modelo A	2000	2000	2300	19 000
Modelo B	500	—	200	150
Modelo C	1000	—	800	1000
Modelo D	—	300	200	—

MPS dado en la tabla 7-16. La diferencia entre el MPS actual y el anterior es el **cambio neto.** El MPS del cambio neto se muestra en la tabla 7-17. Al explotar el MPS del cambio neto se actualizarán todos los registros, pero no se depurará la planeación de requerimientos inexacta.

3.6 Procedimientos adicionales para obtener los netos

Con frecuencia se usan algunas aplicaciones especiales de la explosión y los procesos para obtener los netos, aquí se estudiarán algunos de ellos: **implosión, combinación de requerimientos y vinculación.**

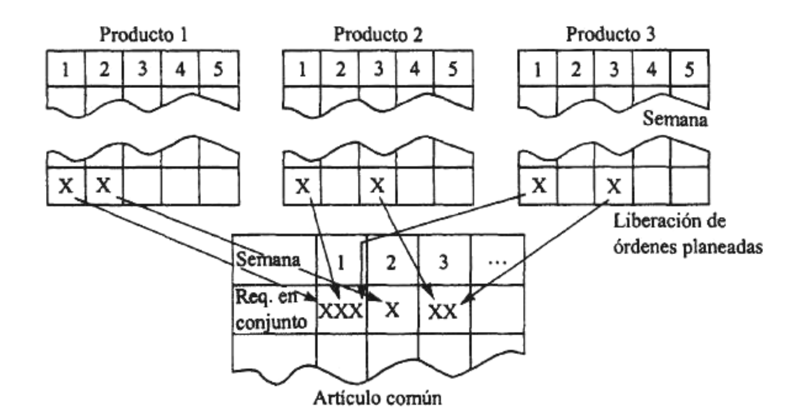
El proceso de implosión es el opuesto del proceso de explosión. La explosión es un procedimiento de arriba hacia abajo y el de implosión de abajo hacia arriba. Se asciende en el diagrama de la estructura del producto y para cada elemento de materia prima se encuentra su producto final. Así, en la estructura del teléfono (figura 7-8), un proceso de implosión para el artículo 1211 subirá en el diagrama en la secuencia: 1211 **a** 121 **a** 12 **a** 1, terminando en el artículo 1 —el producto final—. Este procedimiento encuentra artículos comunes en almacén, es decir, artículos que se requieren para más de un artículo final. Por lo general, la demanda de artículos comunes es menos irregular.

La **combinación de requerimientos** es el proceso de obtener los requerimientos en conjunto de un artículo común. Los requerimientos del mismo artículo que se originan debido a diferentes productos y los niveles de la lista de materiales deben combinarse. Los principios de este procedimiento se muestran en la figura 7-10. Cada semana se combinan las órdenes planeadas liberadas de los tres productos para crear los requerimientos en conjunto del artículo en común.

La **vinculación** es una técnica importante asociada con la combinación de requerimientos; relaciona todos los requerimientos en conjunto de un artículo común con todas las órdenes planeadas distribuidas que crearon el requerimiento, esto es, cada componente del requerimiento

TABLA 7-17
Cambio neto

Producto	Febrero			
	Semana			
	5	6	7	8
Modelo A			+ 300	-100
Modelo B			+ 200	-200
Modelo C			-200	
Modelo D				



Combinación de requerimientos

en conjunto se "vincula" con el número de parte de su fuente. Al vincular se hace posible ascender en la lista de materiales e identificar el producto final de articulo. Entonces, la Vinculación permite ejecutar un proceso de implosión para artículos comunes.

Un uso importante de la vinculación surge cuando ocurren faltantes de un artículo. Es posible entonces emplear un proceso de implosión para rastrear el impacto de un problema de materiales en todos los subensambles y en los productos finales que fueron afectados por este faltante. La desventaja de introducir la vinculación es que se tiene una mayor complejidad en los requerimientos de almacenaje de información del MRP. Sin embargo, el conocimiento de los retrasos posibles en las entregas es muy importante en los mercados actuales.

Los métodos para determinar el tamaño del lote de un solo artículo y su lógica se estudiaron en el capítulo 6. Los sistemas MRP son de artículos múltiples y de varios niveles que abarcan la estructura completa de un producto. En un sistema de varios niveles el tamaño del lote a un nivel determinará los requerimientos en el siguiente nivel hacia abajo en la estructura del producto. El problema es encontrar un conjunto de tamaños de lote en cada nivel, que minimice el costo de preparación y los costos de mantener el inventario para el sistema completo. La manera más sencilla de atacar el problema de niveles múltiples es usar cualquiera de los métodos de tamaño de lote para un nivel y resolver nivel por nivel. Al descender en el diagrama de la estructura del producto, se determinan los tamaños de lote para cada artículo en todos los niveles. Este enfoque, que determina los tamaños del lote según el EOQ, es común en la industria. El problema se puede formular como un modelo grande de programación lineal entera, pero es difícil resolverlo, por lo que se usan varios enfoques heurísticos.

En esta sección se presenta el MRP como un sistema de estratos múltiples. Primero se analiza el inventario en varios estratos y después se ve el MRP como un sistema de control de inventarios de estratos múltiples.

3.8.1 Inventario de estratos múltiples

Recuerde que la estructura de un producto tiene cierto número de niveles (vea, por ejemplo, la figura 7-4). En cada nivel, puede estar presente un inventario de seguridad, un inventario de ciclo, etcétera. Una situación similar existe en un sistema de distribución, en el cual los artículos se producen en una fábrica, se mandan a los almacenes de distribución y después se envían a las tiendas de venta al menudeo.

Es costumbre referirse a cada nivel como **estrato,** donde cada estrato puede ser un punto de almacenaje —de ahí el término de **inventario de estratos múltiples**—. En esta sección se muestra la manera en que el inventario total del sistema varía con el número de puntos de almacenaje. Al hacerlo se sigue a Freeland.[3]

Se hacen las siguientes suposiciones:

- La demanda es insensible al número de puntos de almacenaje *n*.
  La demanda tiene distribución normal y se reparte de manera uniforme entre los puntos de almacenaje. Más aún, las demandas en los puntos de almacenaje son independientes entre sí. Entonces, la variancia de la demanda también se reparte uniformemente.
- Se usa una política de inventarios *(Q, R).Qsc* determina con la fórmula EOQ. *R* se deter mina usando la política 2 (capítulo 6). Así, el inventario de seguridad es igual a

$$s = z\sigma_r$$

donde a_T es la desviación estándar de la demanda durante el tiempo de entrega.

Con base en las suposiciones anteriores, el inventario promedio es

$$\bar{I}(1) = \frac{Q}{2} + s$$

donde, en general, $\bar{I}(n)$ denota el inventario promedio en los n puntos de almacenaje. Recuerde que

$$Q = \text{EOQ} = \sqrt{\frac{2A\bar{D}}{ic}}$$

$$s = z\sigma_\tau$$

Entonces,

$$\bar{I}(1) = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{2A\bar{D}}{ic}} + z\sigma_\tau$$

Para dos puntos de almacenaje, la demanda en cada punto es $D/2$, la variancia de la demanda en el tiempo de entrega es $\sigma_\tau^2/2$ y la desviación estándar es $\sigma_\tau/\sqrt{2}$. El inventario promedio en cada punto de almacenaje es

$$\frac{1}{2}\sqrt{\frac{2A(\bar{D}/2)}{ic}} + \frac{z\sigma_\tau}{\sqrt{2}}$$

Simplificando se obtiene

[3] **Adaptado de Frceland (1985) con permiso de Darden Gradúate School of Business Adtninistration, University of Virginia. Copyright © 1984 por Darden Gradúate Business School Foundation, Charlottesville, Virginia.**

$$\frac{1}{2\sqrt{2}}\sqrt{\frac{2A\overline{D}}{ic}} + \frac{z\sigma_{\tau}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{Q}{2} + s\right)$$

Por lo tanto, el inventario promedio para dos puntos de almacenaje es

$$\bar{I}(2) = 2\left[\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{Q}{2} + s\right)\right] = \sqrt{2}\left(\frac{Q}{2} + s\right) = \sqrt{2}\,\bar{I}(1)$$

Debe ser sencillo observar la generalización para *n* puntos de almacenaje, que lleva a

$$\bar{I}(n) = \sqrt{n}\,\bar{I}(1)$$

En el sistema MRP, si se considera cada nivel como un punto de almacenaje posible, entonces, basado en las suposiciones anteriores, para cada nivel el inventario de seguridad es ***s/4ñ*** en lugar de *s/n* como podría indicar la intuición. El inventario de seguridad total es *(4n)s.*

Es costumbre en los sistemas MRP mantener un inventario de seguridad en sólo un nivel, el de materia prima, producto terminado o subensambles mayores (vea la figura 7-3).

Ejemplo 7-9. Inventario de estratos múltiples. El departamento de empaque de una refinería de azúcar tiene varios productos finales: distintos grados de azúcar empacados en cajas de tamaños diferentes. Uno de sus productos es azúcar pulverizada de grado muy alto que se empaca en cajas de 2 Ib. La estructura del producto tiene dos niveles, como se muestra en la siguiente figura.

Las cajas se compran fuera y se entregan sobre la base de "justo a tiempo"; es decir, no es nece sario tener un inventario. El tiempo de refinamiento del azúcar es cinco días. El tiempo de produc ción (tiempo de llenado) puede despreciarse.

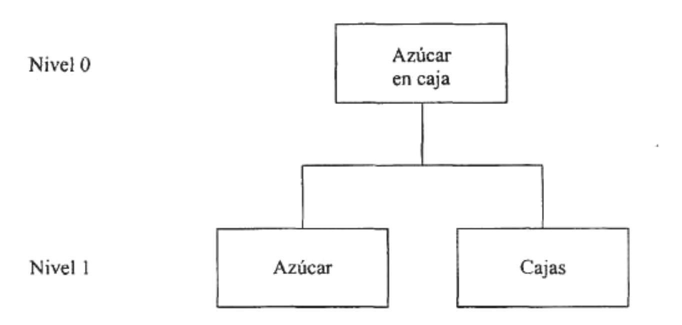
La demanda anual de azúcar tiene una distribución normal con *D* = 800tons yo= 2.5tons. El tiempo de entrega también tiene distribución normal con $Z)_T$ = 16 tons y c = 3.54 tons.

Se requiere una tasa de llenado de p = 95% y *A* - $50, *c*- $4000 por ton e *i* = 20%. Entonces,

$$Q = \sqrt{\frac{2A\overline{D}}{ic}} = \sqrt{\frac{2 \times 50 \times 800}{800}} = 10 \text{ tons}$$

Usando el método del capítulo 6 (sección 3.2.2) se obtiene

$$z = 0.71$$
$$s = z\sigma_{\tau} = 0.71 \times 3.54 = 2.51 \text{ tons}$$



Suponga que sólo se mantiene inventario a nivel 0, es decir, $n = 1$:

$$\bar{I}(1) = \frac{Q}{2} + s = \frac{10}{2} + 2.51 = 7.51 \text{ tons}$$

que se almacenan en cajas de 2 libras. Suponga que se mantiene inventario tanto a nivel 0 como a nivel 1, es decir, $n = 2$:

$$\bar{I}(2) = \sqrt{2}\bar{I}(1) = 10.62 \text{ tons}$$

El inventario de seguridad en cada nivel será

$$\frac{s}{\sqrt{2}} = \frac{2.51}{\sqrt{2}} = 1.77 \text{ tons}$$

y no $2.51/2 = 1.2555$ tons, como la intuición hubiera indicado.

3.8.2 MRP como un control de inventarios de estratos múltiples

Un sistema MRP es en esencia un sistema de varios niveles. Como tal, es apropiada una política de control de inventarios de estratos múltiples. En esta sección se presenta una política tipo revisión continua *(Q, R).* Al hacerlo se siguen las ideas de Axsater y Rosling.[4]

Un sistema de inventarios de estratos múltiples se compone de una jerarquía de puntos de almacenaje. Cada uno de ellos (nivel) se llama una instalación. Una política *{Q, R*)de instalación de almacenaje se basa sólo en la posición del inventario en esa instalación. Por otro lado, una política *{Q, R)* de almacenaje por estratos se basa en la posición del inventario en los estratos, que se obtiene sumando la posición usual en la instalación y todo el inventario hacia abajo en la estructura. El MRP se concibe como un horizonte ondulante, con un enfoque de nivel por nivel que basa sus decisiones de ordenar en los niveles de inventario en la instalación, proyectados al futuro. Las reglas de tamaño de lote, horizonte de planeación, tiempos de entrega, inventario de seguridad y MPS se consideran parámetros de control libres de un sistema MRP.

El modelo que se presentará está basado en las siguientes suposiciones:

Todas las demandas y órdenes (es decir, tanto las demandas de producto terminado como las órdenes de componentes) ocurren al principio del periodo.

- Las órdenes se inician de inmediato, después de ocurrir las demandas, primero para artícu los finales y después para las componentes sucesivas.
- Todas las demandas y las órdenes están en unidades enteras.

Sea

T = horizonte de planeación, en periodos
τ_i = tiempo de entrega para el artículo *i,* en periodos
s_i = inventario de seguridad para el artículo *i,* en periodos
Q_i = cantidad fija a ordenar del artículo *i*
D_{it} = requerimientos externos del artículo *i* en el periodo *t* (programa maestro), en unidades

[4] Adaptado de Axsater y Rosling (1994) con el amable permiso de Elsevier Science-NL, Sara Burgerhatstraat 25,1055 KV Amsterdam, Holanda.

El plan de producción se genera con un enfoque de nivel por nivel, que comienza con los artículos demandados sólo por clientes externos. Los requerimientos externos a lo largo del horizonte de planeación forman el MPS. Se manda una orden de producción en cierto periodo, si la posición del inventario en la instalación menos el inventario de seguridad es insuficiente para cubrir los requerimientos de los siguientes T, periodos. Como la orden tiene lugar después de la demanda del periodo, cuando se ordena, el inventario en la instalación ya está reducido por esta demanda. Así, si x_i = 0 no se tienen requerimientos futuros, y una orden se iniciara si y sólo si la posición del inventario en la instalación es menor que el inventario de seguridad. Por otra parte, si, digamos, x_i = 3, se deben considerar los requerimientos con tres periodos de anticipación. Si es necesario, una orden puede consistir en más de una cantidad a ordenar Q_i.

El programa de producción para los artículos del último nivel conforma los requerimientos para el nivel precedente, por lo que basta con repetir el procedimiento para todos los artículos (instalaciones) en el sistema completo.

Se considerará ahora un sistema en serie (ensamble) con N instalaciones. La instalación 1 es la última y fabrica el producto final. La instalación n representa la adquisición de materia prima. Se supone que la salida de la instalación i, $1 < i < N$, es la entrada para producir una unidad del artículo i — len la instalación que le sigue hacia abajo. Sea w_i la posición del inventario en la instalación /(en algún momento) y sea I_i la posición del inventario del estrato en la instalación i (en algún momento).

$$I_i = w_i + w_{i-1} + \cdots + w_1$$

Una política (Q, R) de estratos múltiples se denota por (Q_i, R_i^e) para cada instalación i. Axsäter y Rosling (1994) usan la siguiente política de estratos múltiples, y demuestran que es equivalente a un sistema MRP diseñado adecuadamente:

$Q_i = j_i Q_{i-1}$ para algún entero positivo j_i (j_i puede ser un multiplicador que desciende por la lista de materiales).

$I_i^o \le R_i^e + Q_i$ para $1 \le i \le N-1$ donde I_i^o es el inventario del estrato inicial.

El sistema MRP equivalente tiene las siguientes relaciones, suponiendo que $D_{1t} = D$ para todo t:

$$s_1 - 1 + D\tau_1 = R_i^e \qquad \text{para } i = 1$$

$$s_i - 1 + D\tau_i = R_i^e - R_{i-1}^e + Q_{i-1} \qquad \text{para toda } i > 1$$

$$s_i - 1 = I_i^o - I_{i-1}^o + k_i Q_{i-1} \qquad \text{para toda } i > 1$$

donde k_i es un entero arbitrario, tal vez negativo.

El lado derecho de las primeras dos ecuaciones se puede interpretar como el punto de reorden del inventario en la instalación, cuando la instalación (i - 1) acaba de ordenar. El lado izquierdo también se puede ver como un punto de reorden, es decir, inventario de seguridad más demanda del tiempo de entrega menos 1. Las ecuaciones anteriores proporcionan un sistema MRP, en el que el inventario disponible proyectado para T, periodos está siempre una unidad abajo de s_i cuando se manda una orden.

No se incluye la demostración de las relaciones anteriores entre la política *(Q, R^e)* y un sistema MRP (vea Axsáter y Rosling, 1994); en su lugar se usará un ejemplo para ilustrar el método.

Ejemplo 7-10. Control de inventarios de estratos múltiples. Considere la política de inventarios de estratos múltiples *(Q_i, R^e_i)*para un sistema de ensamble de dos etapas. Suponga que no hay órdenes pendientes y que

$$R_1^e = 20 \qquad R_2^e = 34 \qquad I_1^o = 18 \qquad I_2^o = 38 \qquad Q_1 = 10 \qquad Q_2 = 30$$

Entonces

$$s_1 - 1 + D\tau_1 = 20$$
$$s_2 - 1 + D\tau_2 = 4$$
$$s_2 - 1 = 20 + k_2 10$$

Suponga que se tiene la siguiente solución:

$$k_2 = -2 \qquad D = 2 \qquad \tau_1 = 1 \qquad \tau_2 = 2 \qquad s_1 = 19 \qquad s_2 = 1$$

El plan MRP para los dos artículos para seis periodos se presenta en la tabla 7-18. Observe que para el artículo \w° =*1*° = *1*8. Como *w*° < *Rf*, se inicia una orden de producción de Q_l - 10 y, al mismo tiempo, se deducen dos unidades debido a la demanda. Entonces, el inventario inicial en el periodo 2 es 26. En el periodo 5, el inventario es 20 <, *Rf* = 20y, por lo tanto, una orden de producción se inicia y se entrega en el periodo 6, ya que x_x = 1.

TABLA 7-18
MRP para un sistema de dos niveles

	Periodo	1	2	3	4	5	6
	Demanda	2	2	2	2	2	2
Artículo 1	Nivel w_1	18	26	24	22	20	28
	Producción	10	0	0	0	10	0
Artículo 2	Nivel w_2	10	10	10	10	30	10
	Producción	0	0	30	0	0	0

Para el artículo 2, w£ = I_2 *-1*° = 20. Como la producción se inició para el artículo 1, se deducen 10 unidades del inventario del artículo 2, dejando 10 unidades. En el periodo 3,I_2 = 34 < R_2 = 34, y se inicia una orden de producción de Q_2 = 30 para entregarse en el periodo 5, ya que x_2 = 2. Observe que en el periodo 5 se retiran 10 unidades del artículo 2 porque se manda una orden de producción para el artículo 1.

Suponga ahora que en el periodo 2 se piden cinco unidades (en lugar de dos). Las posiciones del inventario por estratos son/, =23 e I_2 = 33. El nuevo plan se describe en la tabla 7-19. Se deja al estudiante verificarlo.

TABLA 7-19
MRP para el periodo 2

	Periodo	2	3	4	5	6	7
	Demanda	5	2	2	2	2	2
Artículo 1	Nivel w_1	23	21	19	27	25	23
	Producción	0	0	10	0	10	0
Artículo 2	Nivel w_2	10	10	30	30	30	30
	Producción	30	0	0	0	0	0

3.9 Tamaño del lote y tiempo de entrega[5]

Las restricciones de capacidad afectan el tiempo de entrega (sección 2.5). El tamaño del lote afecta también ese tiempo de entrega. Éstas son las principales razones por las que se critica el enfoque de tiempo de entrega fijo del sistema MRP estándar. En esta sección se modelan las relaciones entre el tamaño del lote y el tiempo de entrega. Al hacerlo, se sigue la exposición de Karmarkar, Kekre y Freeman (1985), resumida por Baker (Graves, Rinnooy Kan y Zipkin, 1993). Ellos identifican dos fenómenos que deben estar presentes en cualquier modelo de tiempo de entrega; el **efecto del lote o pedido y** el **efecto de saturación.**

Un aumento en el tamaño del lote debe incrementar el tiempo de entrega. Esto se llama **efecto del lote.** Un lote o pedido de una unidad se puede mover a la siguiente operación en cuanto se completa su procesamiento. Sin embargo, un lote de cinco unidades no se mueve hasta terminar las cinco. La primera unidad terminada espera hasta que se completan las otras cuatro para moverse a la siguiente operación. Al duplicar el tamaño del lote a 10 se requiere que la primera unidad espere el procesamiento de nueve más. Mientras más grandes sean los lotes, más largos serán los retrasos de las partes que esperan la terminación del resto del lote (vea la figura 10-23 del capítulo 10).

El **efecto de saturación** funciona de manera opuesta. Cuando el tamaño del lote disminuye y la preparación no se reduce, el tiempo de entrega eventualmente aumentará. La razón es que, si la demanda se conserva, al reducir el tamaño de los lotes habrá más lotes en la planta. El resultado es que las preparaciones llevarán más tiempo y quedará menos tiempo para procesamiento. En consecuencia, la demanda se convierte en una proporción relativamente grande de la capacidad disponible, y la congestión aumenta. Como los efectos de los dos fenómenos son opuestos, el comportamiento agregado del tiempo de entrega como una función del tamaño del lote debe tener forma de U como se muestra en la figura 7-11.

Se puede usar teoría de colas para modelar la situación anterior. Considere un sistema de colas de un solo servidor que atiende a *n* productos diferentes. Suponiendo llegadas Poisson y una distribución arbitraria para el tiempo de servicio (sistema de servicio M/G/l), la fórmula estándar para el retraso en la cola (tiempo de entrega) es

$$L = \frac{(\lambda/\mu)^2 + \lambda^2\sigma^2}{2\lambda(1-\lambda/\mu)} + \frac{1}{\mu}$$

donde λ = tasa media de llegadas

μ = tasa media de servicio

σ^2 = variancia del tiempo de servicio

Sea

D_j = demanda por periodo del producto j

t_j = tiempo de producción unitario para el producto j

S_j = tiempo de preparación para el producto j

Q_j = tamaño del lote para el producto j (la variable de decisión)

[5] Adaptado de Baker (en Graves *et ai* (1993)) con el amable permiso de Elsevier Science-NL, Sara Burgerhartstraat 25,1055 KV Amsterdam, Holanda.

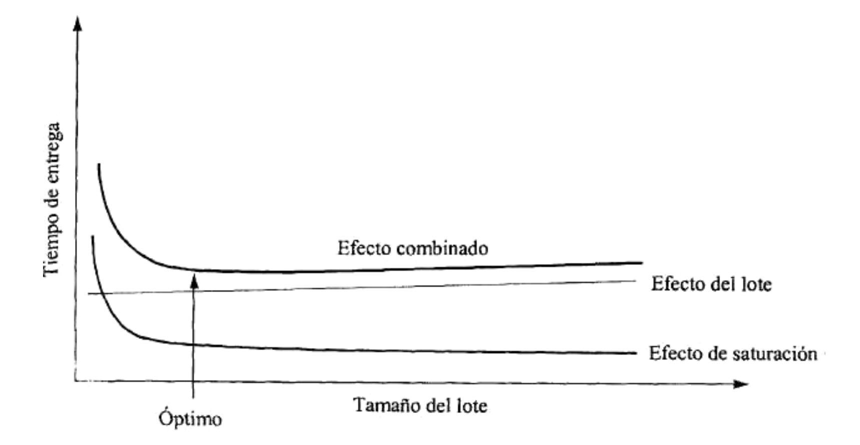


FIGURA 7-11
Tamaño del lote y tiempo de entrega

Un lote o pedido es un "cliente", de manera que la tasa media de llegadas es

$$\lambda = \sum_{j=1}^{n} \lambda_j = \sum_{j=1}^{n} \frac{D_j}{Q_j}$$

donde

es la tasa media de llegadas de los lotes o pedidos del producto *j*. El tiempo medio de servicio es un promedio ponderado dado por

$$\mu = \frac{\sum_{j=1}^{n} \lambda_j (S_j + t_j Q_j)}{\sum_{j=1}^{n} \lambda_j}$$

y la variancia del tiempo de servicio es

$$\sigma^2 = \left(\frac{\sum_{j=1}^{n} \lambda_j (S_j + t_j Q_j)^2}{\sum_{j=1}^{n} \lambda_j} \right) - \frac{1}{\mu^2}$$

Sustituyendo estos valores de A,, u y a^2 en la ecuación para *L,se* puede obtener el tiempo de entrega. Esta ecuación es una versión multivariada de la función que se decribe en la figura 7-11. Este proceso se ilustra con el siguiente ejemplo.

Ejemplo 7-11. Tiempo de entrega. Considere un centro de trabajo que fabrica cuatro productos. La demanda semanal se obtiene del MPS, y los tiempos de preparación y de producción unitario se muestran en la tabla 7-20. Después de establecer la fórmula de *L* en una hoja de cálculo, se hace una búsqueda por prueba y error (¡inténtelo!), que lleva cerca del valor mínimo en unas cuantas iteraciones. La búsqueda da $L^* = 1.29$ semanas, con $Q_x = 60$, $Q_2 = 1300$, $Q_3 = 400$ y $Q_4 = 500$.

TABLA 7-20
Parámetros del producto

Producto	D_j (semanal)	S_j (horas)	t_j (horas por 1000)
1	100	3	30
2	500	15	45
3	50	6	75
4	250	24	150

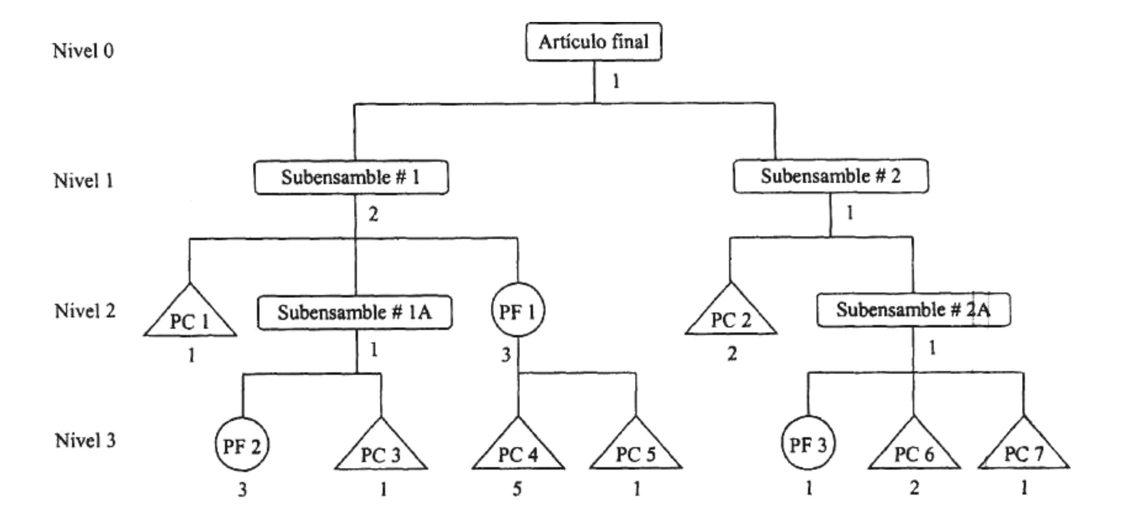
SECCIÓN 3 EJERCICIOS

7.24. ¿Cuál es el objetivo principal de un sistema MRP?
7.25. ¿Por qué los sistemas MRP sustituyen a los sistemas de punto de reorden?
7.26. Enumere y defina los insumos de un sistema MRP.
7.27. Enumere y defina las salidas de un sistema MRP.
7.28. Desarrolle un diagrama de estructura de producto para lo siguiente:

á) Una hamaca se elabora con una cama de cuerda, dos terminaciones de madera y dos ensambles de armella. Una cama de cuerda se construye con 150 pies lineales de cuerda. Una terminación de madera se fabrica con cuatro pies lineales de madera de 2" x 1.5". Un ensamble de armella se hace con una armella y un gancho.

b) Una margarita de seda se elabora con una flor y una vara. Una flor consiste en un centro de plástico y 15 pétalos. Una vara se hace con un tallo de plástico y tres hojas. Una hoja se hace con tres pulgadas cuadradas de seda verde y 0.05 onzas de un agente endurecedor. Un pétalo se hace con una pulgada cuadrada de seda blanca y 0.01 onzas de agente endurecedor.

7.29. Escriba la lista de materiales indentada para el inciso *a)* del problema 7.28.
7.30. Describa el proceso MRP.
7.31. Para la estructura del producto genérico y el MPS que se muestran a continuación, realice la parte de la explosión del proceso MRP.



(Los números debajo de los símbolos de las partes indican cantidad.)

Nivel	Artículo	Cantidad semanal					
		1	2	3	4	5	6
0	Art. final	150	200	240	190	140	100

7.32. Dadas las siguientes recepciones programadas para el subensamble # 1 en la estructura del producto genérico del ejercicio 7-31, realice el procedimiento para obtener los requerimientos netos si el inventario disponible en el tiempo 0 es 75.

Recepciones programadas por semana					
1	2	3	4	5	6
500	300	100	50	0	0

7.33. Realice el procedimiento de compensación para los requerimientos netos del ejercicio 7-32, supo niendo un tiempo de entrega de tres semanas y un tamaño de lote de 500 unidades.

7.34. Complete el registro MRP que se muestra en la siguiente tabla para el subensamble # 2 de la es tructura de producto del ejercicio 7.31. Utilice las siguientes suposiciones:

- Tiempo de entrega para el subensamble #2 = 2 semanas.
- Tiempo de entrega para el resto de las partes = 1 semana.
- Tamaño de lote para el subensamble # 2 = 300 unidades.
- Se usa el método de lote por lote para determinar los tamaños de lote para el resto de las partes.

Ejercicio 7.34 (*continuación*)

Nivel	Artículo	Cantidad	Semana						
			Actual	1	2	3	4	5	6
1	S/E # 2	1							
	Req. en conjunto			150	200	240	190	140	100
	Recep. progr.			50	35	20	0	0	0
	PIB		500						
	Req. netos								
	Recepciones planeadas								
	Liberación de órd. planeadas								
2	PC 2	2							
	Req. en conjunto								
	Recep. progr.			0	0	100	0	0	0
	PIB		230						
	Req. netos								
	Recepciones planeadas								

Ejercicio 7.34 (*continuación*)

Nivel	Artículo	Cantidad	Semana						
			Actual	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
	Liberación de órd. planeadas								
2	S/E # 2A	1							
	Req. en conjunto								
	Recep. progr.			0	0	0	0	0	0
	PIB		90						
	Req. netos								
	Recepciones planeadas								
	Liberación de órd. planeadas								
3	PF 3	1							
	Req. en conjunto								
	Recep. progr.			50	50	50	0	30	0
	PIB		175						
	Req. netos								
	Recepciones planeadas								
	Liberación de órdenes planeadas								
3	PC 6	2							
	Req. en conjunto								
	Recep. progr.			0	0	0	500	0	0
	PIB		500						
	Req. netos								
	Recepciones planeadas								
	Liberación de órdenes planeadas								
3	PC 7	1							
	Req. en conjunto			210	300	0	0	0	0
	Recep. progr.			200	0	0	0	0	0
	PIB		350						
	Req. netos								
	Recepciones planeadas								
	Liberación de órdenes planeadas								

7.35. Describa las diferencias entre el método de regeneración y el método del cambio neto para actualizar el registro MRP.

7.36. La Pérez Plastics Company fabrica platos y vasos desechables; tiene tres tamaños de vasos de plástico: grande, mediano y chico. El MPS para estos productos se muestra en la tabla. Suponga que el MPS cambia como se muestra. ¿Cuál es el cambio neto? Compare el número de registros que se actualizan si se usa el método del cambio neto, con los del método de regeneración. (Las cantidades están en miles de unidades.)

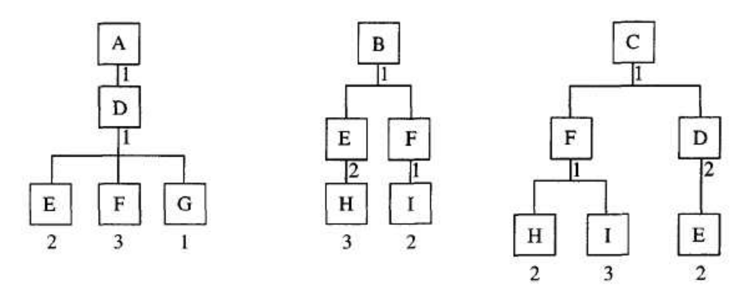
MPS para los vasos de Pérez Plastics Company (en miles de unidades)

	Semana					
	1	2	3	4	5	6
Grande	50	25	44	80	40	25
Mediano	300	800	450	200	200	200
Chico	100	250	100	300	100	100

MPS nuevo para los vasos de Pérez Plastics Company (en miles de unidades)

	Semana					
	1	2	3	4	5	6
Grande	50	25	44	50	40	25
Mediano	300	800	450	200	200	200
Chico	100	250	100	100	50	50

7.37. Dadas las tres estructuras de producto en el siguiente MPS, obtenga los requerimientos en conjunto para todas las partes.



(Los números debajo de los símbolos de las partes indican cantidades.)

	Periodo				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
MPS del artículo A	25	20	20	22	10
MPS del artículo B	100	80	70	70	60
MPS del artículo C	89	88	87	80	70

7.38. Suponga que los requerimientos combinados para un periodo en la parte F de la estructura del producto anterior son 400 unidades y se vinculan como sigue:

180 Artículo A
100 Artículo B
120 Artículo C

Realice una implosión para determinar los requerimientos de todas las partes.

7.39. Para el periodo descrito en el ejercicio 7.3 8, se canceló una entrega de 300 unidades de la parte H. Sugiera un MPS alternativo que minimice el número de entregas que fallan de los tres artículos.

7.40. Explique el efecto del lote o pedido y el efecto de saturación.

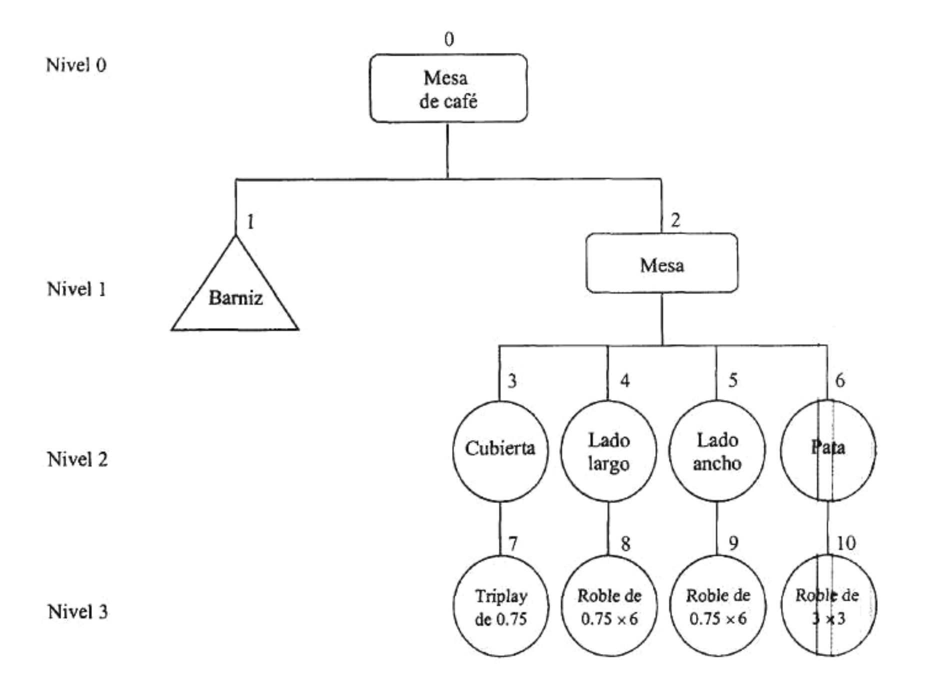
7.41. Calcule la tasa media de llegadas de los lotes para el siguiente escenario:

	Producto j				
	1	2	3	4	5
D_j	24	10	81	43	66
Q_j	50	50	100	50	75

7.42. Desarrolle un diagrama de estructura de producto para lo siguiente:

a) Un par de patines de línea
b) Un archivero
c) Una lámpara de mesa

7.43. Careta Darby planea la producción para Kitsch Designs, Inc.; ella realizó una explosión simple de la estructura de producto para una mesa de café que fabrican, para estimar los requerimientos en conjunto de las componentes a todos los niveles para la próxima semana. Los resultados de la ex plosión se muestran en la siguiente figura. Complete el diagrama de estructura de producto agre gando las cantidades que se requieren.



Nivel	Núm. de artículo	Requerimiento neto
0	Mesa	400
1	1	800
2	2	800
2	3	2400
2	4	1600
2	5	800
3	6	4000
3	7	2400
3	8	3200

7.44. Pérez Plastics (vea el ejercicio 7.36) debe mandar 300 000 vasos medianos por semana durante las próximas 6 semanas y 275 000 por semana durante las siguientes tres semanas. El departamento de envíos está programado para recibir 400 000 vasos medianos la próxima semana (semana 1) y 350 000 en la semana 3. En este momento sólo tienen 50 000 vasos medianos en inventario. Cal cule el balance de inventario proyectado y los requerimientos netos para cada semana.

7.45. Se usan cinco onzas de plástico para producir cada vaso mediano en Pérez. Los vasos se producen en cantidades que satisfacen la demanda de 1.5 semanas. Genere las recepciones y distribuciones de órdenes planeadas del plástico usando una política de lote por lote. Por ahora, Pérez tiene 2 800 000 onzas de plástico en inventario. Suponga que el tiempo de entrega de los vasos es una semana y del plástico dos semanas.

7.46. Los MPS para los vasos grandes y chicos en Pérez Plastics para las próximas seis semanas están dados en el ejercicio 7.36. No hay demanda de vasos grandes en las tres semanas siguientes y se requieren 100 000 vasos chicos por semana. Se necesitan ocho onzas de plástico para producir un vaso grande y 3.5 para un vaso chico. Utilice el MPS y las recepciones descritas en el ejercicio 7.44 de los vasos medianos para desarrollar los registros MRP para los tres vasos y el plástico. Pé rez tiene 70 000 vasos grandes y 100 000 chicos en almacén y está programado para recibir 2 000 000 onzas de plástico en la semana 1 y 2 000 000 en la semana 4.

7.47. Desarrolle un registro de vinculación para los plásticos del ejercicio 7.46 para la semana 4.

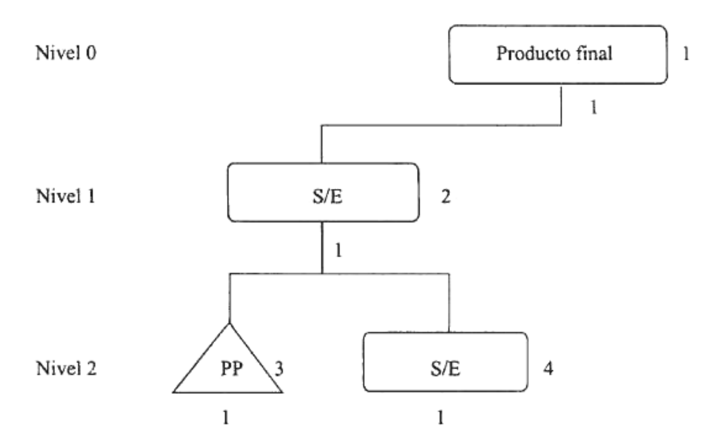
7.48. Utilice una hoja de cálculo y el método de prueba y error para determinar los tamaños de lote en la siguiente tabla que se acerquen al tiempo de entrega mínimo.

	Producto				
	1	2	3	4	5
D_j (unidades/semana)	45	80	62	30	25
t_j (horas)	0.50	0.78	0.35	0.12	0.65
S_j (horas)	4.1	2.0	1.6	2.5	4.0

7.49. Grafíque el tiempo de entrega como una función del tamaño del lote para cada producto del ejerci cio 7.48. ¿Para qué tamaño de lote es mínimo el tiempo de entrega de cada producto?

7.50. Considere el segmento de un diagrama de estructura de producto que se muestra en la siguiente página (vea la leyenda de la figura 7-7). El tiempo de entrega entre los niveles 2 y 1 es un día, y el tiempo de entrega entre los niveles 1 y 0 es 2 días. La demanda del artículo terminado es constante de 100 unidades diarias, y A = \$500, /= 20%. No se requiere preparación para la operación de en samble en el nivel 1.

a) Evalúe el inventario y el inventario de seguridad si se almacena sólo en el nivel 0.
b) Repita el inciso *a)* si se almacena a nivel 0 y a nivel 1.
c) Repita el inciso *a)* si se almacena a los tres niveles. Interprete sus resultados.



7.51. Genere un plan MRP para un sistema de dos niveles, usando un enfoque de estratos múltiples, dado que no hay órdenes pendientes y que

$$R_1^e = 30 \qquad R_2^e = 44 \qquad I_1^o = 28 \qquad I_2^o = 48 \qquad Q_1 = 20 \qquad Q_2 = 30$$

Suponga que el horizonte de planeación es de ocho periodos y haga las suposiciones necesarias.

4 CONTROL DE PLANTA

Hasta ahora se ha hecho hincapié en los elementos de planeación del MRP. Después 4e la etapa de planeación viene la etapa de ejecución, durante la cual el plan se pone en marcha. La ejecución debe tener seguimiento y supervisión mediante un conjunto de procedimientos agrupados con el nombre de **control de planta** (CP). El control de planta es un módulo separadoj en el sistema MRP (figura 7-2). Por lo general, el control de planta tiene cuatro procedimientos primordiales: **mandar una orden, programarla, supervisarla y actualizar parámetros.**

El procedimiento para **mandar una orden** verifica la factibilidad de las órdenes planeadas generada por el MRP; realiza dos funciones: verificación de disponibilidad de mkteria prima, partes y subensambles y verificación de la disponibilidad de la capacidad. Comprueba también la factibilidad del plan de compra contra las posibilidades de los proveedores.

El procedimiento de **programación** detalla la orden mandada por el MRP. La orden se realiza en baldes de tiempo, por lo común semanas. La rutina de programación maneja el flujo de trabajos durante la semana, la carga de las máquinas, la asignación de operadores a¡ las tareas y la secuencia de prioridades. Durante la semana, la rutina de programación adapta el programa a las condiciones cambiantes en la planta. Los modelos de programación se estudiarán en el capítulo 8.

El procedimiento de **supervisión** da seguimiento a las órdenes de trabajo que están en la planta, al nivel de trabajos en proceso y al trabajo realizado por vendedores externos. Dependiendo de las necesidades, la supervisión actualiza el inventario y revisa las recepciones programadas.

Por último, la rutina de **actualización** revisa periódicamente los parámetros del MRP para que reflejen la situación de la planta. Esto incluye tiempo de entrega, capacidad, producción y datos similares. La adecuación de estos parámetros es predominante en los cálculos del MRP.

SECCIÓN 4 EJERCICIOS

7.52. Describa el control de planta.

7.53. Zydecon Electronics Company produce radios y tocacintas portátiles. Un radio está hecho con dos subensambles eléctricos idénticos y una caja. Cada subensamble eléctrico requiere dos baterías. Un tocacintas está hecho con otros dos subensambles idénticos y una caja (idéntica a la caja del radio). Cada subensamble requiere una batería. Hemente, el encargado de la planeación de la producción, obtuvo las siguientes cantidades del MRP:

	Recepción de órdenes planeadas				
	Semana				
Producto	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Tocacintas	0 0	570	960	0	610 0
Radio		0	830	690	

Hemente usa un tiempo de entrega de una semana para calcular los tiempos para mandar las órdenes. Los artículos y subensambles requieren los centros de trabajo y tiempos que se muestran en la tabla junto con las capacidades de los centros. Realice una verificación detallada de la capacidad para determinar si el programa de Hemente es factible. Si no lo es, sugiera una programación de órdenes para resolver el problema de capacidad.

Parte	**Núm. de centro de trabajo**	**Tiempo (min)**
Cinta	1	20
	2	17
S/E eléctrico (tocacintas)	4	40
Caja	3	36
Batería	5	10
Radio	2	55
S/E eléctrico (radio)	4	37

	Centro de trabajo				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
Capacidad	10 000	30 000	33 000	50 000	28 000

5 OTROS ASPECTOS DEL MRP

5.1 El MRP como sistema de información

Un sistema MRP se basa en la computadora. Entonces, se puede describir en forma esquemática dentro de la "tecnología de las computadoras", en esencia, de otra manera. En la figura 7-12 se muestra un sistema de información MRP. Las órdenes de compra y las órdenes de trabajo son la salida más importante de un sistema MRP. Las notificaciones de reprogramación se mandan a la planta cuando se requiere un cambio. Se dan dos ejemplos de otros beneficios que se obtienen.

Un presupuesto de compra se puede obtener multiplicando las cantidades que apareen en las órdenes de compra por sus costos unitarios respectivos. Como las órdenes de compita se hacen por etapas, se puede desarrollar un presupuesto mensual, trimestral o anual, dependiendo del horizonte de planeación. Este presupuesto se puede comparar con el presupuesto asignado y para hacer ajustes. El resultado final de este proceso es un **plan de materiales** que muestra las cantidades requeridas y la asignación del presupuesto en el tiempo.

Otro beneficio posible del sistema MRP es una **simulación "qué pasa si",** mediante la cual se puede examinar la factibilidad de los cambios en el MPS (debidos, por ejemplo,¡ a la llegada de una nueva orden de un cliente) y se puede dar la fecha de entrega adecuada. Esto se logra con la introducción de la nueva cantidad al MPS y el uso del método de cambio neto para verificar la factibilidad de la capacidad y los materiales. Con la reciente proliferación de estaciones de trabajo y computadoras PC, la simulación de "qué pasa si" ha ganado popularidad.

5.2 Aspectos adicionales del MRP

Vale la pena mencionar algunos otros aspectos del MRP, a saber, **MRP de ciclo cerrado** y **MRP en sistemas de distribución.**

MRP de ciclo cerrado. Hasta ahora se ha resaltado la importancia del MRP en la etapa de planeación. Es obvio que en la ejecución las cosas no ocurren justo como se planearon. Puede ser que la demanda cambie, las entregas se retrasen y la producción se interrumpa. El resultado es que, al pasar el tiempo, el estado en la planta es diferente del planeado. Esta nueva condición debe reflejarse en el MRP para que el plan sea válido. Esto se consigue a través del MIJU? de ciclo cerrado, cuya información sobre la ejecución del plan se retroalimenta al sistema MRP. LOS registros MRP se actualizan según la situación real. El plan se mantiene válido y las nuevas co-

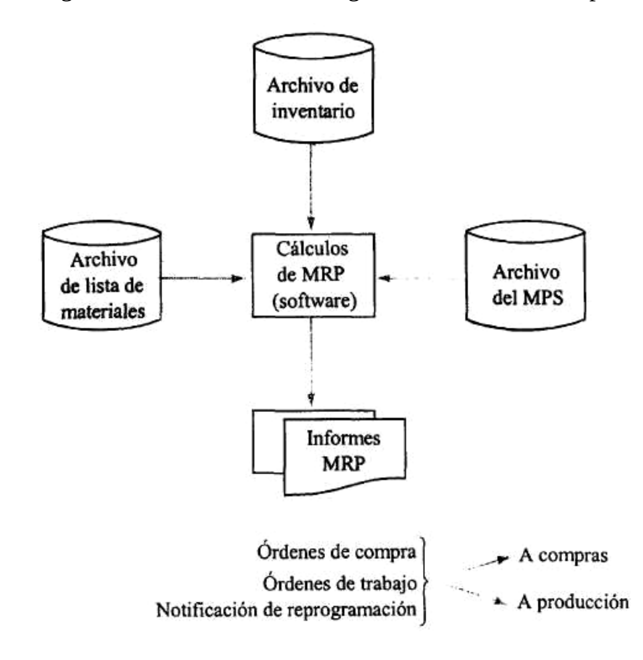


FIGURA 7-12
Sistema de información MRP

rridas del MRP emitirán órdenes realistas. La figura 7-2 muestra este ciclo de retroalimentación.

MRP en sistemas de distribución. Un sistema de distribución consiste en varios almacenes con una relación jerárquica entre ellos. Puede haber un almacén local, uno regional, un centro de distribución, etcétera. Cada nivel en este sistema se puede considerar un nivel en la lista de materiales. Las órdenes generadas en el almacén local generarán requerimientos para el almacén regional, que a su vez los generará para el centro de distribución. El procedimiento MRP se puede aplicar a los sistemas de distribución y en ocasiones se le llama **planeación de requerimientos de distribución (DRP).**

5.3 Beneficios y deficiencias del MRP

Sin duda, el MRP tiene muchos beneficios al igual que diversas fallas, como los tienen muchas herramientas de administración. Se examinará este aspecto. Se profundizará en él en un contexto más amplio cuando se analice el MRP II en el capítulo 10.

Beneficios. Los beneficios del MRP tienen lugar durante las etapas de planeación y ejecución del plan de producción. La mayor ventaja durante la planeación es la habilidad para evaluar la factibilidad y los requerimientos de distintos planes de producción. Al hacerlo, se puede prometer al cliente una fecha de entrega más confiable. Además, un resultado de esta etapa es un "plan de materiales" en términos de cantidades por intervalo, que se pueden transformar en un "presupuesto por intervalo". Esto se puede verificar y comparar con el plan de presupuesto de materiales para hacer ajustes. De esta manera se puede implantar la política de administración de inventarios.

Durante la etapa de ejecución, el MRP juega un papel importante en el control y reducción de inventarios. Una aplicación primordial de los sistemas MRP es la identificación de faltantes y excedentes futuros. Cuando se identifica una situación de faltantes, se realiza una acción correctiva que **acelera** las órdenes existentes (recepciones programadas) que se encuentran en la tubería. De manera similar, en el caso de excedentes, se retrasan o se cancelan las órdenes existentes.

La identificación de faltantes requiere, entre otras cosas, un seguimiento de abastecimientos-tiempo de entrega. El sistema MRP puede ser una herramienta para clasificar proveedores en términos de la confiabilidad de su tiempo de abastecimiento.

Deficiencias. La mayor parte de los sistemas MRP comerciales disponibles suponen tácitamente una **capacidad de producción infinita** (vea la sección 2.3). El resultado es que el plan de producción obtenido necesita ajustes para tomar en cuenta las restricciones de capacidad finita. Algunas aplicaciones de software de MRP recientes intentan considerar este aspecto. La capacidad infinita se puede ver como una desventaja inherente al sistema. Otros elementos pueden causar problemas a menos que se le dé un tratamiento adecuado, como la inclusión de *incertidumbre, tiempos de entrega/producción, rendimiento, nerviosismo del sistema* e *integridad de los datos.*

Incertidumbre. El sistema MRP es un sistema determinístico. En realidad, la incertidumbre afecta cada parámetro de este sistema, incluyendo la incertidumbre sobre las cantidades futuras de producción, abastecimiento y tiempos de entrega. Se puede evadir la incertidumbre generando un inventario de seguridad en varios niveles del proceso de producción o creando

cierta cantidad de margen de seguridad en las cantidades de producto terminado, lo que generará de manera automática un inventario de seguridad en todos los niveles. En ambos casos, existe el peligro de tener niveles de inventario excesivos. Otro enfoque es tener un inventario de seguridad a nivel de materia prima y usar el concepto de Pareto para estrechar el control y permitir distintos niveles de inventario de seguridad para los artículos A, B y C.

Tiempo de entrega/producción. Las discrepancias entre los tiempos de entrega reales y los planeados pueden trastornar el plan de producción sugerido, por el MRP. Si se considera que este sistema tiene que manejar cientos de productos en inventario, la distribución del tiempo de entrega puede presentar una dificultad significativa. No es práctico aplicar los métodos para manejar la variabilidad del tiempo de entrega, presentados en el capítulo 6, cuando se tienen tantos artículos. El concepto de Pareto también es útil aquí. Los artículos B y C se unen en grupos de "tiempo de entrega", donde este tiempo se da para cada grupo. Los artículos A tienen sus tiempos de entrega individuales, mismos que se supervisan y actualizan con frecuencia.

Rendimiento. En la mayoría de los procesos de producción, algunos artículos se rechazan debido a que no cumplen los estándares de calidad. El *rendimiento* es el cociente de la cantidad de productos aceptables entre la cantidad planeada. Si el rendimiento es 97%, entonces de 100 artículos sólo 97 se entregarán. Por lo tanto, las cantidades de materia prima tienen que incrementarse en el porcentaje de rechazo (3%) con el fin de poder cumplir con la entrega planeada. En este ejemplo, la producción debe comenzar con materia prima para 100/0.97 (aproximadamente 103 unidades) para obtener 100 productos aceptables.

Nerviosismo del sistema. El MRP no se usa en un entorno estático. El MRP se actualiza de manera constante, los registros del MRP se ponen al día en corridas de actualización. El MRP no sólo se actualiza sino se amplía. Si se tiene un horizonte de planeación de 12 meses, una actualización un mes después requerirá agregar otro mes al final de los 11 restantes. (Esto se conoce como **"horizonte ondulante"** de 12 meses.) Como resultado de los cambios introducidos en la corrida de actualización, pueden variar las cantidades de las órdenes planeadas. Peor aún, puede ser que haya que cambiar las recepciones programadas. Este fenómeno se conoce como **nerviosismo del sistema.** Para superarlo, muchos sistemas MRP introducen un **horizonte congelado;** es decir, mantienen constantes el MPS y las órdenes planeadas durante cierto número de intervalos futuros. Estos intervalos casi siempre son de seis semanas. En el mundo de producción dinámica actual, cada vez es más difícil manejar el horizonte congelado.

Integridad de los datos. Un sistema MRP, igual que muchos otros, es muy sensible a inexactitudes en los datos. En particular, los archivos de lista de materiales e inventario deben mantener un alto grado de integridad. La lista de materiales debe tener la última versión de la estructura del producto. Los registros de inventario deben ser muy precisos. Es común que se requiera un nivel de exactitud mayor al 92% para que el sistema MRP opere en forma efectiva. Esta no es una tarea sencilla; no obstante, no tiene caso invertir en un sistema MRP y no obtener sus beneficios por falta de integridad en los datos.

Ahora se analizará cómo se aplica el MRP en el mundo real.

SECCIÓN 5 EJERCICIOS

7.54. ¿Qué es la planeación de requerimientos de distribución?

7.55. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de usar un sistema MRP?

7.56. Describa cómo se puede usar un sistema MRP para determinar el número de empleados a contratar.

7.57. BAM Chemical Company fabrica productos que requieren sólo un proceso de manufactura. Este proceso es muy rápido y BAM conserva una capacidad adicional para evitar ventas perdidas. Los tiempos de entrega de la materia prima son largos y variables. El pronóstico es difícil y con frecuencia inexacto. BAM tiene un almacén en sus instalaciones, desde donde envía las órdenes directo a los clientes. Existe un inventario alto de producto terminado. ¿Es adecuado el MRP? ¿Por qué sí o por qué no?

6 APLICACIÓN Y EVOLUCIÓN DEL MRP

El MRP es uno de los sistemas de control que más se aplican; existen virtualmente miles de aplicaciones. Éstas ocurren en organizaciones pequeñas y grandes que fabrican una gran variedad de productos. Es difícil establecer una distinción entre una aplicación de MRP en sí y el MRP como parte de un sistema más amplio llamado planeación de recursos de manufactura (MRP II). El mismo razonamiento se aplica al software de MRP. Estos dos aspectos se analizarán en el capítulo 10, en el que se presentan los sistemas de MRP II. Mientras tanto, para obtener un panorama más amplio sobre las aplicaciones de MRP, en el cuadro 7-1 se presenta el caso de la Merit Brass Company, de Cleveland, Ohio, que al usar MRP logró una inversión menor en inventario y mejoró sus tiempos de entrega.

La evolución del MRP también se percibe con un alcance más amplio; el MRP ha crecido como parte de la evolución general de los sistemas integrados de planeación y control de la producción. Se estudiará este tema en el capítulo 10.

CUADRO 7-1

MERIT BRASS COMPANY

Casi siempre, la gente piensa en los sistemas MRP unidos en esencia a la administración de inventarios de demanda dependiente y, en efecto, jugó ese papel en Merit Brass. Sin embargo, un aspecto con la misma importancia para el sistema fue la planeación de requerimientos de capacidad (CRP); la CPR es un proceso más complejo y exigente en Merit Brass que la planeación de materiales. La compañía fabrica niples de latón y acero inoxidable que tienen sólo tubos de latón y de acero inoxidable como materia prima. Las operaciones primordiales consisten en cortar el tubo al largo deseado, filetearlo para hacer el niple, desengrasar los niples y empacarlos para mandarlos al inventario de distribución. Como los niples tienen una gran variedad de largos y diámetros (de ahí, el número de partes mayor que 2000), antes del MRP los gerentes de planta nunca sabían si un programa de producción en particular era factible. Esto era frustrante para ellos y para otros gerentes en la compañía con quienes interactuaban, en particular el de ventas.

Como la planta estaba organizada en células de manufactura, se desarrolló una base de datos de MRP separada para cada célula. Esto proporcionó las mismas ventajas de los módulos que se describieron para pronósticos. Las ocho células de manufactura varían en el número de números de parte y el volumen de las partes que producen. Una célula pequeña tiene menos de 100 números de parte asignados a ella, mientras que una grande tiene más de 600. Cada célula grande tiene un día de la semana para su corrida de actualización, pero las pequeñas se combinan en más de una en un día. El resultado es un programa de cinco días que cubre las ocho células. La PC en la que se corre el MRP realiza muchas otras funciones, no está dedicada sólo al MRP. La única información no disponible en la PC que se necesita para correr la actualización es el nivel de inventario actual para cada parte o material. Los analistas de sistemas de la compañía desarrollaron una herramienta sencilla, análoga a la descrita para pronósticos, para cargar

CUADRO 7-1
(continuación)

estos datos importándolos al archivo de estado del inventario del MRP. Esta herramienta permite que el personal de administración de la planta agregue o elimine números de partes en una base de datos del MRP cuando es necesario, sin soporte adicional del analista de sistemas.

Los pronósticos que usa el MRP se calculan cada mes; mientras que el MRP en la planta se corre cada semana. Para conciliar estas frecuencias, los pronósticos se importan a un programa en hoja de cálculo, se convierten a un programa semanal y después los importa el sistema MRP. Las conversiones semanales suponen un patrón de 4,4,5 semanas en cada mes de cada trimestre (así, marzo tendrá siempre 5 semanas). El pronóstico de demanda mensual se mantiene intacto en este proceso. Como algunos números de parte tiene una demanda baja, esto se logra igualando la última semana de cada mes al pronóstico mensual menos la suma de los pronósticos de las semanas anteriores. En el caso en que la demanda se pronostica como una unidad, las primeras tres (o cuatro) semanas tienen un pronóstico de cero y la última semana tendrá una unidad. Este sistema ha funcionado bastante bien en la práctica, ya que los patrones de demanda tienden a ser constantes con variaciones aleatorias.

La compañía usa ciertas características claves del módulo STORM MRP. Por ejemplo, planea los recursos de capacidad (CRP) a través de un archivo de lista de materiales. Los usuarios piensan en la lista de materiales simplemente como en una lista de recursos e introducen los materiales descendientes de un artículo y los tiempos de preparación y operación para cada número de parte en cada paso del procesado. El informe de carga de capacidad que se obtiene es crítico para la administración de la planta y para planear la producción en tiempo extra cuando se necesita.

Otra característica del programa STORM MRP es que mantiene niveles de inventario de seguridad. Si se proporcionan los niveles deseados de inventario de seguridad para cada artículo, el programa MRP corrige las órdenes planeadas de acuerdo con la situación que prevalece de inventario escaso o excesivo. Esto evita que el inventario crezca si una parte no se está vendiendo y recupera rápidamente el inventario de seguridad si hay una corrida para un artículo.

Al usar la característica sólida de órdenes planeadas, el gerente de planta puede anular la planeación de órdenes sugerida por el sistema MRP. Esto es útil cuando se quieren suavizar las cargas de capacidad durante el horizonte de planeación.

Los procedimientos de tamaño de lote también son útiles, pero de manera poco usual e interesante. Como las células de manufactura están organizadas alrededor de familias de partes, cada vez que se corre una familia se quiere correr cada parte en la familia que tiene una necesidad neta. Así, el costo de preparación se prorratea entre todas las partes de la familia. Los procedimientos del tamaño del lote económico están diseñados, en general, para productos individuales pero no para familias de partes. Es necesario tener un programa ondulante en el que todos los números de partes en una familia deben producirse más o menos al mismo tiempo.

Para lograr esto, se hizo un ejercicio de tamaños de lote económico independientes usando una hoja de cálculo. Se buscó identificar un ciclo de producción económico para cada familia, de partes haciendo un trueque entre los costos de mantener inventarios tanto de ciclo como de seguridad y los costos de preparación. Si la familia tenía un solo artículo clase A con demanda alta, la familia tendría un ciclo de producción económico de alrededor de un mes, sin importar la demanda de otros números de partes. Si la familia no incluye tal número de parte, un ciclo de alrededor de dos meses proporcionó un trueque razonable. Como se tiene un tiempo de cambio de cero para ir de un número de parte a otro dentro de una familia de productos, se puede hacer la corrida de las partes de volumen bajo en la familia en el mismo ciclo que las partes de volumen alto. Fue sencillo elaborar un plan maestro que pedía producir familias de alto volumen una vez al mes y familias de bajo volumen una vez cada dos meses. Se usó la regla de tamaño del lote de periodo fijo del STORM para implantar los resultados del análisis económico.

CUADRO 7-1
(continuación)

Después de unos cuantos meses de operación, se observó un problema perturbante con las partes que tenían poca demanda. El MRP pedía la producción de dos unidades de abastecimiento de un mes. Sin embargo, el número de unidades de esa parte que se empacaba podía ser 5,25 o más unidades por paquete. Se corrigió este problema para estos artículos específicos, cambiando la regla del tamaño del lote a una regla de cantidad fija e introduciendo la cantidad mínima por paquete como el valor fijo. Una vez más, se encontró que cumplir con las necesidades del usuario requería tanto software como ingenio.

Preparar las órdenes de compra para cerca de 6000 números de partes es una gran tarea para Merit Brass que era el distribuidor maestro. Antes de implantar el MRP, la compañía compraba cada trimestre. Varios problemas se asociaron con esta práctica. Primero, tenían que recibirse y guardarse envíos demasiado grandes. Muchas de estas partes compradas debían volverse a empacar antes de venderse, y esto creaba una demanda muy irregular en el área de empaque. Segundo, la compañía estaba forzada a tener una inversión muy alta en inventario cuando tenía disponibles el abastecimiento de varios meses más un inventario de seguridad. Los proveedores también debían tener grandes inventarios antes de mandar las órdenes, en algunos casos, las ventas a Merit Brass representaban gran parte de su capacidad. Por último, si la compañía se quedaba sin un artículo, el siguiente envío llegaría después de meses, durante los cuales el artículo quedaría como órdenes atrasadas. Como cada orden de compra trimestral podía contener varios cientos de artículos, que el gerente de compras revisaba a mano, la compañía no podía satisfacer órdenes más frecuentes sin la ayuda de los modernos sistemas de administración.

Ahora la compañía prepara pronósticos para los artículos comprados igual que lo hace para los que fabrica. Estos pronósticos entran a un proceso MRP que permite correcciones por inventarios de seguridad lo mismo que para los productos fabricados. Como las bases de datos del MRP son de grupos de productos, la compañía ahora hace compras mensuales con cada proveedor; el resultado es envíos más frecuentes y parejos. Comparte los informes de la explosión de la lista de materiales de varios meses futuros con sus proveedores para facilitar su planeación de la capacidad. Esto ha dado como resultado tiempos de entrega más cortos y entregas más confiables de los proveedores.

Fuente: reimpreso con permiso, Flowers (1993), The Institute of Management Sciences and the Operatíons Research Society of America (actualmente INFORMS).

7 RESUMEN

Este capítulo se dedicó a tres actividades de planeación importantes: la planeación de la producción, la capacidad y el material.

Primero se hizo la distinción entre demanda independiente y dependiente. La demanda independiente (como la de artículos finales) se pronostica, mientras que la dependiente se planea. La planeación de la demanda dependiente es el pilar común de este capítulo y se presenta a través del proceso de planeación-producción.

La producción tiene una estructura jerárquica que va de las estimaciones de la demanda a través del programa maestro de producción (MPS) a la planeación de requerimientos de materiales (MRP) y a la ejecución —plan de materiales, órdenes de planta, control de planta—.

Un programa maestro de producción es un plan de producción —cuántos productos terminados y cuándo deben fabricarse—. El desarrollo del MPS debe considerarse la naturaleza del

producto y del mercado. Se identifican tres tipos de ambientes de comercialización relacionados con el MPS: producción para inventario (PPI), producción por pedido (PPP) y ensamble por pedido (EPP).

Debido a la naturaleza del MPS, se usan registros por intervalos para la planeación y el mantenimiento del MPS. Se estudiaron enfoques cuantitativos para los modelos PPI y EPP.

La factibilidad del plan de producción depende, entre otras cosas, de la capacidad disponible. La capacidad se evalúa a nivel del MPS y de MRP. En el nivel del MPS se verifica su factibilidad inicial, que recibe el nombre de planeación preliminar de la capacidad (PPC). La planeación detallada de la capacidad, también llamada planeación de requerimientos de capacidad (CRP), se realiza a nivel del MRP. Los dos procesos son de naturaleza similar y se ilustraron a través de ejemplos. Tanto el PPC como el CRP son herramientas de información más que para la toma de decisiones y se manejan como planeación de capacidad infinita. Para concluir el análisis de la capacidad se presentó un modelo de entrada/salida.

El MRP es la fuerza que mueve al sistema de planeación-producción. El principal objetivo del MRP es determinar los requerimientos —demanda discreta de cada componente en cada balde de tiempo—. Requiere tres insumos importantes: un programa maestro de producción, los registros del estado del inventario y una lista de materiales.

La salida principal del sistema MRP es la distribución de órdenes planeadas. Las órdenes de compra conforman el plan de compra mientras que las órdenes de trabajo generan el plan de producción para la planta.

La salida del MRP se obtiene en cuatro pasos: explosión, obtención de netos, compensación y tamaño del lote. Se usó un teléfono de botones para ejemplificar cada paso. Este ejemplo se usó además para ilustrar el proceso de explosión a niveles múltiples.

Una vez que el proceso MRP se pone en marcha, requiere actualización. Se presentaron dos métodos de actualización, regeneración y cambio neto. El cambio neto se lleva a cabo de manera continua, mientras que la regeneración se realiza una vez cada periodo.

Un sistema MRP tiene procedimientos para obtención de netos suplementarios. Estos son implosión, combinación de requerimientos y vinculación. La vinculación permite ejecutar un proceso de implosión para determinar artículos comunes.

En esencia, un sistema MRP es un sistema de niveles múltiples. Se analizaron dos aspectos de los niveles múltiples: primero, cómo se forma un inventario de niveles múltiples y, segundo, cómo se incorpora el control del inventario de niveles múltiples a los sistemas MRP.

Un aspecto importante que se deriva del tamaño del lote es su impacto sobre el tiempo de entrega. Se presentaron análisis de esta relación. Al hacerlo, se identificaron dos fenómenos, el efecto del lote y el efecto de saturación. Si se logra un balance entre los dos, se obtiene un valor óptimo para el tiempo de entrega. La teoría de colas se usa para modelar esta situación.

Cuando se ejecuta el MRP, debe supervisarse y darse seguimiento al plan. Esto se hace mediante un conjunto de procedimientos que llevan el nombre de control de planta. Éste constituye un módulo separado del sistema MRP. Por lo general, tiene cuatro procedimientos primordiales: distribución de órdenes, programación, supervisión y actualización.

Para completar el análisis de los sistemas MRP, se examinó el MRP como un sistema de información con su salida y la posibilidad de "qué pasa si". Se presentó el concepto de "MRP de ciclo cerrado", seguido de la aplicación del MRP a sistemas de distribución.

Algunos beneficios de un sistema MRP son su habilidad para planear y simular la factibilidad de los distintos planes de producción, la identificación de faltantes y excedentes y el seguimiento del tiempo de abastecimiento. Dos de las mayores desventajas son la capacidad infinita

y el tiempo de entrega fijo. La incertidumbre y el rendimiento introducen "ruido" al sistema. Por último, los sistemas MRP son muy sensibles al grado de integridad de los datos.

Las aplicaciones en el mundo real, el software y la evolución de estos sistemas se estudiarán en un capítulo posterior.

EJERCICIOS ADICIONALES

7.58. Vered trabaja en el departamento de planeación de Preston Brass Company, que fabrica accesorios para baño y cocina de cobre. Ella ha desarrollado el siguiente MPS para el modelo 317 de PBC para las siguientes seis semanas.

MPS						
	Semana					
Actual = 750	**1**	**2**	**3**	**4**	**S**	**6**
F,	550	540	540	540	540	540
O,	600	400	500	150	100	0
I,	150	710	170	730	190	750
MPS	0	1100	0	1100	0	1100
ATP	150	200		850		110

Vered usa un promedio móvil de dos semanas para pronosticar la demanda de la siguiente semana. La política de PBC establece un horizonte congelado de dos semanas, en el que no se pueden cambiar las cantidades de producción proyectadas. El costo de mantener para el 317 es $0.15 por unidad por semana. El costo de preparación es $150 por lote. El costo de producción es $2.25 por unidad. PBC vende el 317 en $3.00 por unidad. Los clientes tolerarán un tiempo de entrega de tres semanas, pero comprarán en otro lado si no se cumplen. El departamento de producción fabrica en lotes de cualquier tamaño y Vered se da cuenta de que algún cambio en el tamaño del lote del 317 puede reducir costos.

Simule el trabajo de Vered para las siguientes seis semanas respecto al MPS para el modelo 317, dados los siguientes eventos durante cada semana. Observe que debe actualizar el MPS seis veces, incorporando la nueva información de una semana a la vez. Calcule los costos para cada semana, incluya un costo por ventas perdidas debido a la producción del 317 que dicte su MPS.

Semana 1: 150 unidades ordenadas para la semana 2
200 unidades ordenadas para la semana 6
10 unidades ordenadas para la semana 8
Semana 2: 100 unidades canceladas para la semana 3
100 unidades canceladas para la semana 4
300 unidades ordenadas para la semana 7
Semana 3: 150 unidades ordenadas para la semana 8
75 unidades ordenadas para la semana 9
50 unidades ordenadas para la semana 10
Semana 4: 50 unidades canceladas para la semana 6
300 unidades ordenadas para la semana 11
Semana 5: 100 unidades ordenadas para la semana 6
Semana 6: 300 unidades ordenadas para la semana 12

7.59. Formule un modelo MPS para un entorno de PPI que incluye restricciones de tiempo extra, subcontratación y faltantes. *(Sugerencia:* consulte el capítulo 5.)

7.60. Dados los datos de la tabla para un ambiente de EPP, formule matemáticamente el MPS. Se tienen 70 horas disponibles durante el periodo 1 y 80 en el periodo 2. Una unidad del módulo 1 incurre en un costo de mantener inventario de $0.20 por periodo y requiere 25 minutos de procesamiento. Cuesta $0.16 almacenar una unidad del módulo 2 y requiere 10 minutos de procesamiento.

Órdenes de los clientes			
j	Producto	Cantidad	Semana de entrega
1	1	20	1
2	1	14	1
3	2	25	1
4	3	10	1
5	3	9	1
6	1	20	2
7	1	10	2
8	1	10	2
9	2	22	2
10	3	20	2

Programación del ensamble final		
	Semana 1	Semana 2
Producto 1	34	40
Producto 2	25	22
Producto 3	19	20
Cantidades de módulo por producto		
	Módulo 1	Módulo 2
Producto 1	2	1
Producto 2	0	4
Producto 3	2	2

π_{jt}										
	j									
t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0.67	0.67	0.67	0.77	0.86
2	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0

π_{jt} = costo de la sanción si la orden *j* se satisface en el periodo *t*

7.61. Janet Huang acaba de ser asignada a la tarea de desarrollar el MPS para la producción de su compañía para las próximas ocho semanas. La compañía, Saburg, Inc., fabrica sistemas de almacenamiento para armarios y ensambla las componentes bajo pedido. La Sra. Huang recuerda el modelo de programación entera para obtener el MPS en un entorno de EPP. Aunque no tiene las herramientas para resolver su problema de optimalidad, piensa que será un buen ejercicio reunir la información pertinente y calcular los coeficientes, y le dará una mejor idea de cómo obtener una

solución de bajo costo. En las tablas se muestran las órdenes de los clientes para las próximas ocho semanas, las utilidades por unidad para cada producto y los costos de almacenar los productos. El departamento de ventas de Saburg ofrece descuentos por entregas atrasadas que aumentan cada semana que se atrasa la orden, como se observa en los datos. Los clientes de Saburg rechazarán el envío después de tres semanas, lo que significará ventas perdidas. Describa un procedimiento general que Janet pueda seguir para calcular los costos de analización para su modelo. ¿Cuál será su matriz 71;?

Órdenes de los clientes de Saburg, Inc.

Orden núm.	Producto	Cantidad	Semana de entrega
1	A	100	1
2	E	52	1
3	B	65	2
4	A	78	3
5	C	96	3
6	D	154	4
7	D	13	4
8	C	14	5
9	E	87	6
10	A	99	7
11	B	15	8
12	B	36	8

Producto	Costo de almacenar (dólares por u nidad-semana)	Descuento (dólares por orden-semana)	Utilidad (dólares por unidad)
A	0.50	25.00	10.75
B	0.24	12.50	5.50
C	0.12	8.00	4.30
D	0.36	15.00	6.80
E	0.10	6.00	2.60

7.62. Cloudsox Industries produce banderas bordadas para vender en su tienda de la playa en Seabreeze, North Carolina. Esta temporada de otoño están fabricando tres nuevas banderas: una bandera de hojas, una de día de muertos y una de Navidad. Cada bandera requiere cinco operaciones procesadas en tres centros de trabajo. En el primer centro, se corta el material; en el segundo se traspasa el patrón a la tela y se fijan las aplicaciones; la bandera se cose y se termina en el tercer centro de trabajo. La ruta de las tres banderas para las tres operaciones se muestra a continuación.

Producto	Operaciones		
	Corte	Fijado	Cosido
Hoja Día de	CT100	CT400	CT300
muertos Navidad	CT100	CT200	CT300
	CT100	CT200	CT500

Darnell Walker, quien comenzó en Cloudsox como cortador, se interesó en las computadoras y se ofreció para escribir un conjunto de programas en hoja de cálculo que realizarán las funciones de un sistema MPS. Rein Moore, el dueño de Cloudsox, le pidió a Darnell que la aconsejara sobre las cantidades de producción para el otoño. Ella piensa, por los datos históricos, que Cloudsox puede vender cierta cantidad de banderas en su tienda esta próxima temporada (descrita en la tabla que sigue), y piensa usar estas cantidades para planear la producción. Sin embargo, Rein ha encontrado un nuevo mercado para las banderas, que podría aumentar estas cantidades en un 40%

para los tres tipos. Rein necesita ahora que Darnell determine si la planta puede manejar la carga adicional.

Programa maestro de producción Cloudsox

	Septiembre				Octubre				Noviembre				
Bandera	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
H	1510	15	15	17	20	20	20	22 15	2	20 5	155	155	155
M	8	10 8	128	12	20	20	20	15	0	25	25	25	10
N				8	10	10	10		5				

Darnell ha hecho las siguientes proyecciones sobre las horas de mano de obra para las tres banderas nuevas y sobre las capacidades disponibles en cada estación de trabajo para dedicar a las banderas de otoño. ¿Qué debe decir Darnell a Rein sobre la capacidad requerida esta temporada con o sin el incremento del 40% en la demanda? Identifique una causa de inexactitudes en el plan preliminar de Darnell. ¿Qué puede hacer Darnell para reducir el número de cálculos necesarios para verificar los requerimientos de capacidad?

Capacidades por centro de trabajo en Cloudsox

Centro de trabajo	Capacidad (h/semana)
100	16
200	8
300	16
400	8
500	8

Requerimientos de producción en Cloudsox

Bandera	Tamaño del lote	Centro de trabajo	Preparación (h/lote)	Corrida (h/unidad)
Hojas	20	100	0.10	0.125
		400	0.25	0.050
		300	0.15	0.250
Día de muertos	25	100	0.10	0.105
		200	0.22	0.030
		300	0.20	0.200
Navidad	25	100	0.15	0.120
		200	0.25	0.045
		500	0.25	0.320

7.63. El MPS para tres productos se muestra en la siguiente tabla. Cada producto requiere procesarse en tres centros de trabajo: CT100, CT200 y CT300. El producto A requiere 0.86 horas de mano de obra estándar. El producto B requiere 1.24 horas y el producto C, 2.08 horas. Los datos de los últimos cinco años del total de horas de mano de obra directa trabajadas en cada centro de trabajo se muestran en la segunda tabla. Desarrolle un método para realizar un plan de capacidad preliminar y determine si el MPS es factible. Si no lo es, sugiera un MPS alternativo que sea factible.

Plan maestro de producción (unidades)													
	Período												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
A	35	35	35	42	42	42	32	32	32	40	40	40	40
B	15	15	15	12	12	12	12	20	20	20	20	25	25
C	8	8	8	8	8	14	14	20	20	22	22	22	22

Horas de mano de obra directa en cada centro					
	Año				
CT	**1989**	**1990**	**1991**	**1992**	**1993**
100	1200	1050	990	1140	1250
200	560	1100	625	700	620
300	980	600	600	850	1000

7.64. Usted es un analista en una planta de producción que produce equipo de ejercicio. Los problemas de calidad con el modelo de bicicleta estacionaria JX han creado una necesidad para una operación adicional en el proceso de manufactura del marco JX. Por ahora el marco pasa por tres operaciones antes de entrar al ensamble final: corte de tubo, soldadura y pintura. La nueva operación, llamada soldadura posterior, ocurrirá entre las operaciones de soldadura y pintura. Usted ha revisado centros de trabajo similares en la planta y ha estimado que cada bicicleta requerirá 15 minutos de procesado por un operador en un centro de trabajo. Con el fin de planear, se cuenta con 6.8 horas por día de trabajo disponibles para esta operación.

Sarah Bunch del departamento de instalaciones dice que tiene el equipo y el espacio para poner hasta tres centros de trabajo idénticos para este proceso. Jim Beck, del departamento de planeación, dice que el sistema MRP actualmente usa un tiempo de entrega de cero para la bicicleta como producto terminado y un tiempo de entrega de dos semanas para el marco. Las órdenes de producción de la JX para las últimas dos semanas fueron 150 (hace dos semanas) y 200 (la semana pasada). Los tiempos actuales de procesado para las otras operaciones están dados en la tabla. Determine qué diría a Sarah y Jim sobre la nueva operación.

Operación	**Tiempo de procesado (min/unidad)**
Corte del tubo	10
Soldadura	12
Pintura	12

7.65. Complete el registro MRP que se muestra enseguida. El costo de preparación para WN es $85 por lote. La preparación para NL cuesta $168 por lote. El costo de almacenaje para WN es $0.18 por unidad para cada semana y para NL es $0.07 por unidad por semana. Calcule el costo total (costo de preparación más almacenaje) para su registro MRP. Cambie los tamaños de lote para lograr la mayor reducción que pueda en el costo total.

			Semana						
Nivel	**Artículo**	**Cant.**	**Actual**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
1	WN	1							
	Req. en conjunto			150	200	240	190	140	100
	Recep. progr.			200	0	0	200	0	0
	PIB		100						
	Req. netos								
	Recep. planeadas								
	Liberación órd. planeadas								
2	NL	2							
	Req. en conjunto								
	Recep. progr.			0	0	200	0	0	0
	PIB		460						
	Req. netos								
	Recep. planeadas								
	Liberación de órd. planeadas								

7.66. Kudzukes, Inc. opera cinco tiendas de departamentos en Georgia y Alabama. Tienen un centro de distribución en Atlanta, Georgia y almacenes regionales en Birmingham, Alabama y Macón, Georgia. El almacén de Birmingham da servicio a las tiendas de Auburn y Huntsville. El de Macón da servicio a las tiendas de Thomaston y Savannah. El centro de distribución da servicio también a la tienda de Atlanta. Se han hecho los siguientes pronósticos para cada tienda para un herbario que vende el departamento de jardinería.

Pronósticos para el herbario

	Semana						
Tienda	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Atlanta	90	90	90	90	110	100	110
Huntsville	34	34	40	40	40	50	50
Auburn	33	33	33	35	35	35	35
Thomaston	20	20	20	20	22	22	22
Savannah	95	95	95	95	95	100	100

Las siguientes cantidades representan envíos que van en camino de alguna localidad a otra. Se necesitan tres días para procesar y enviar una orden del centro de distribución de Atlanta a Birmingham o a Macón. Una orden se puede procesar y enviar en el mismo día del centro de distribución a la tienda de Atlanta. Los envíos de los almacenes regionales a las tiendas se llevan a cabo una vez a la semana.

		A			
		Auburn	**Hunstville**	**Thomaston**	**Savannah**
De	Birmingham	50	55	25	125
	Macón				

		A		
		Birmingham	**Macón**	**Tienda Atlanta**
De	Centro de distrib. Atlanta	200	200	100

El centro de distribución de Atlanta tiene 200 herbarios en inventario. Birmingham y Maco tienen 45 y 30, respectivamente. Utilice la lógica del MRP para calcular los requerimientos por intervalo en cada localidad.

7.67. En el problema 7.49 se examinó el tiempo de entrega como una función del tamaño del lote, para cada producto del problema 7.48. Desarrolle un método para separar la función para cada produc to y agregue graneas para los efectos del lote y de saturación a sus esquemas.

7.68. Describa el procedimiento para generar los cambios de inventario proyectado a partir de un siste ma de información MRP.

7.69. Dé el registro MRP que creó en el problema 7.46 para los vasos de plástico de Pérez Plastics, si mule el trabajo del personal de planeación para las próximas cinco semanas, tomando en cuenta los siguientes eventos (observe que es necesario actualizar el registro MRP para cada semana por separado.)

Semana 1: producción tiene problemas con la preparación de moldes y pide tamaños de lote iguales o mayores que 50 vasos. Llegan órdenes de vasos grandes que deben entregarse en las semanas 7 y 8; esto cambia el MPS para esas semanas a 25 000 y 20 000 unidades, respectivamente. El MPS para la semana 10 es el siguiente: vasos grandes = 0, vasos medianos = 200 000 y vasos chicos = 100 000.

Semana 2: la administración está preocupada por el patrón errático que muestran las cantidades ordenadas para las próximas tres semanas y quiere suavizar la producción. El MPS para la semana 11 es 150 000 vasos grandes, 200 000 medianos y 150 000 chicos.

Semana 3: llega un envío de 400 000 onzas de plástico dañado. El departamento de envíos puede recuperar 280 000 onzas para producción. El MPS para la semana 12 es 10 000 vasos grandes, 150 000 medianos y 150 000 chicos.

Semana 4: el departamento de ingeniería hace un cambio en los vasos chicos y crea un nuevo molde para producirlos. Ellos quieren saber qué tan pronto pueden enviar la nueva versión. El MPS para la semana 13 es 0 vasos grandes, 150 000 medianos y 100 000 chicos.

Semana 5: se recibe una orden de 50 000 vasos grandes que no estaba planeada, y el departamento de ventas quiere saber qué fecha de entrega puede prometer al cliente. El MPS para la semana 14 es 0 vasos grandes, 150 000 medianos y 75 000 chicos.

MINICASO: ROCKVILLE PRODUCTS COMPANY

Rockville Products Company fabrica muebles. Sus tres productos con mayores ventas son una consola para estéreo, una consola para televisor y un librero para equipo de sonido y video. La instalación tiene 15 años en el negocio y fue creada como un taller de producción intermitente. Tenían un taller de máquinas, en el que se fabricaban las componentes de madera; un área de terminado donde se teñían, pintaban o laminaban las componentes, y un taller de ensamble para unir las componentes y empacarlas para enviarlas a las tiendas de muebles. RPC sostiene un

programa de mejoramiento (PI) y los equipos de PI han hecho varios cambios en la planta para acercarse más a un proceso de producción continua. El costo de la maquinaria nueva era muy alto y no fue posible colocar las máquinas ni las tareas de terminado en células de ensamble, pero se hizo una nueva distribución para el resto de la instalación, de manera que los procesos de ensamble son celulares. El equipo del área de máquinas está trabajando en un proyecto para reducir la preparación de todas las máquinas y han progresado. El departamento de planeación implantó un sistema *kanban,* mediante el cual se han reducido los tamaños de lote para muchas componentes.

La producción en RPC es estacional y los clientes requieren tiempos de entrega cortos, por lo que RPC usa un entorno de PPL Desde que se hicieron los cambios, el departamento de planeación ha observado que ocurren más faltantes y para compensarlos han aumentado sus pronósticos. RPC usa un sistema MRP que también maneja su sistema de costos y contabilidad. La evaluación del equipo de producción se basa en la eficiencia, un porcentaje del tiempo real por unidad contra el tiempo estándar por unidad.

Usted acaba de entrar a trabajar a RPC y su trabajo es analizar sus problemas y ofrecer soluciones para guiar a la compañía en su búsqueda de mejoras. Toby, la gerente de contabilidad, ha pasado toda la mañana en su oficina quejándose sobre el estado de la compañía. Ella dice: "¡ninguna de estas llamadas mejoras se ha reflejado al final de la línea en los costos! El inventario es demasiado alto, el taller de máquinas está muy por encima de su presupuesto por los costos de tiempo extra y ¡nuestros clientes no están recibiendo sus órdenes a tiempo! Pienso que este 'concepto de equipo' que estamos intentando reforzar está permitiendo que los empleados se aprovechen de la compañía. Ellos hablan mucho sobre los problemas y trabajan muy poco. ¿De qué otra manera puedes explicar el lío en el que estamos?" Ronnie, el supervisor del taller de máquinas, tiene otra opinión cuando usted va a verlo. Él dice: "ahora tenemos más órdenes de trabajo activas que las que nunca tuvimos, y ¡nos llegan estas órdenes por cantidades tan pequeñas! Apenas la semana pasada, mi personal estuvo dos horas preparando una máquina para hacer 45 partes. En cuanto acabaron la preparación para la siguiente orden, ¡recibí otra orden de trabajo de otras 45 partes del primer tipo! Por supuesto que no es rentable si el departamento de planeación hace cosas estúpidas como esa. Todavía más, ¡nuestra área de almacenamiento está llena a reventar! La hemos llenado con tarimas a medio llenar porque los lotes son tan pequeños. Ese asunto del *kanban* es la causa de nuestros problemas." El facilitador del mejoramiento continuo, Arnold, también tiene qué decir: "Estamos usando un sistema de medición anticuado para juzgar a la gente. ¿De qué sirve la eficiencia? Hemos probado que una parte es manejada por un ser humano sólo 3% del tiempo que pasa en esta planta. ¿Por qué no estamos analizando los tiempos de ciclo? ¿Por qué no estamos haciendo mejoras mayores en la reducción de la preparación? Somos esclavos del sistema MRP y nadie parece reconocer que las reglas del juego han cambiado y que los números del MRP ya no tienen sentido."

En la tabla se encuentran los datos de las tres componentes que se usan en los productos de mayor volumen de Rockville Products Company. Las tres se producen en el taller de máquinas.

Parte	Preparación anterior (horas)	Preparación nueva (horas)	Tamaño de lote anterior (unidades)	Tamaño de lote nuevo (unidades)	Tiempo de corrida (h/unidad)
XB360	**1.00**	**0.75**	**300**	**50**	**0.03**
C044P	**1.25**	**0.75**	**150**	**100**	**0.08**
AM900	**2.15**	**1.50**	**175**	**75**	**0.10**

¿Qué recomendaría que hiciera el gerente de planta de RPC? ¿Cómo respondería a los comentarios hechos por Toby, Ronnie y Arnold? Utilice métodos matemáticos cuando sea posible para justificar sus sugerencias; haga las suposiciones que sean necesarias. Prepare un informe para la administración.

8 REFERENCIAS

Axsáter, S. y Rosling, K., "Multi-Level Production-Inventory Control: Material Requirements Planning or Reorder Point Policies?" *European Journal ofOperations Research,* 75,405-412,1994. Baker, K. R., "Requirements Planning", en Graves, S. C, Rinooy Kan, A. H. G., y Zipkin, P. H., eds. *Logistics ofProduction and Inventory,* North Holland, Amsterdam, 1993. Blackburn, J. D. y Millen, R. A., "The Impact of a Rolling Schedule in a Multi-Level MRP System", *Journal ofOperations Management,* 2(2), 125-135, 1982.

Flowers, A. D. "The Modernization of Merit Brass", *Intetfaces,* 23(1), 97-108, 1993. Freeland, J. R., "A Note on the Relationship Between The Number of Stocking Points and Average Inventory", Darden Gradúate School of Business Administration, University of Virginia, (UVA-OM-483), 1985. Graves, S. C, Rinnooy Kan, A. H. G., y Zipkin, P. H., eds, *Logistics ofProduction and Inventory,* North Holland, Amsterdam, 1993. Guerrero, H. H., "Demand Management Strategies for Assemble-to-Order Production Environments", *International Journal ofProduction Research,* 29(1), 39-51, 1991. Karmarkar, U. S., Kekre, S., y Freeman, S., "Lot Sizing and Lead Time Performance in Manufacturing Cell", *Interfaces,* 15, 2, 1-9, 1985. Karni, R., "Capacity Requirements Planning—Optimal Workstation Capacities", *International Journal ofProduction Research,* 19, 5, 595-611, 1981. Kami, R., "Capacity Requirements Planning—A Systematization", *International Journal ofProduction Research,* 20,6,715-739,1982. King, B. E. y Benton, W. C, "Alternative Master Production Scheduling Techniques in an Assemble -to-Order Environment", *Journal ofOperations Management,* 7(2), 179-201, 1987. Maes, J. y Van Wassenhove, L., "A Simple Heuristic for the Multi ítem Single Level Capacitated Lot Sizing Problem", *Operations Research Letters,* 4,6,265-273,1986. McClelland, M. K., "Order Promising and the Master Schedule", *Decisión Sciences,* 19(4), 858-879, 1988.

McClelland, M.K., y Wagner, H.W., "Location of Inventories in the MRP Environment", *Decisión Sciences,* 19(3), 535-553,1988. Vollman, T. E., Berry, W. L., y Whybark, D.C., *Manufacturing Planning and Control Systems,* Business One Irwin, Homewood, IL, 1992. Wijngaard, J. y Wortmann, J. C, "MRP and Inventories", *European Journal ofOperation Research,* 20, 283-293,1985.



Programación de operaciones

1 INTRODUCCIÓN

Newnan Foundries produce diferentes moldes de metal para la industria automotriz. El proceso es un rundido con arena, con partes moldeadas en máquinas automáticas. El proceso de producción de una fundidora común consiste en las operaciones que se muestran en la figura 8-1. Un horno proporciona metal líquido a una máquina de moldeo automática. La máquina usa un patrón (guardado en el taller de patrones) para hacer los moldes de manera automática, a partir de una o más partes. Cuando el metal rundido entra a la máquina, fluye a través de compuertas y rampas para llenar el molde y formar una parte. Si la parte tiene un espacio hueco en su interior, se colocan machos en los moldes antes de llenarlos. Los machos se hacen de arena u otro material en el taller de machos. La máquina de moldeo se abre y expulsa partes y arena, después repite el proceso.

La arena y las partes moldeadas se colocan en un vibrador que quita la arena para usarla de nuevo y, también, separa muchas partes de las compuertas y rampas. Si la parte sigue pegada a una compuerta o a una rampa, se separa manualmente. En este punto, la parte puede ser enviada al cliente. Casi siempre se realizan operaciones de terminado en los moldes. Éstas pueden incluir esmerilado, recubrimiento, tratamiento por calor, y varias pruebas como ultrasonido, calibración o inspección.

La fundidora produce más de mil partes distintas para varios cientos de clientes. Una orden de un cliente, o un trabajo, especifica el número de partes idénticas que deben hacerse y una fecha de entrega para el trabajo. Cada parte tiene una hoja de ruta que contiene información de producción. Las hojas de ruta incluyen toda la información necesaria para hacer la parte, por ejemplo, contenido de la aleación, patrón, ruta y requerimientos de mano de obra. Como un trabajo consiste en cierto número de las mismas partes, es sencillo obtener la información para el trabajo de la información de la parte.

Como puede inferirse del proceso de producción, la fundidora intenta minimizar el inventario de producto en proceso y producto terminado. Es importante enviar el trabajo al cliente en la fecha de entrega, pero no debe producirse con demasiada anticipación. Esto da un espacio de tiempo durante el cual debe producirse cada orden.

Los trabajos con tiempos similares se unen en el plan de producción. Cada día se genera un programa de trabajo para un horizonte ondulante de cinco días. La planta se diseñó para que hubiera un flujo suave de productos a través del proceso sin inventario intermedio así, la línea de producción completa se maneja como un solo procesador. El taller de machos tiene una capacidad mayor que la línea; su programa está determinado por el programa de la fundidora. El

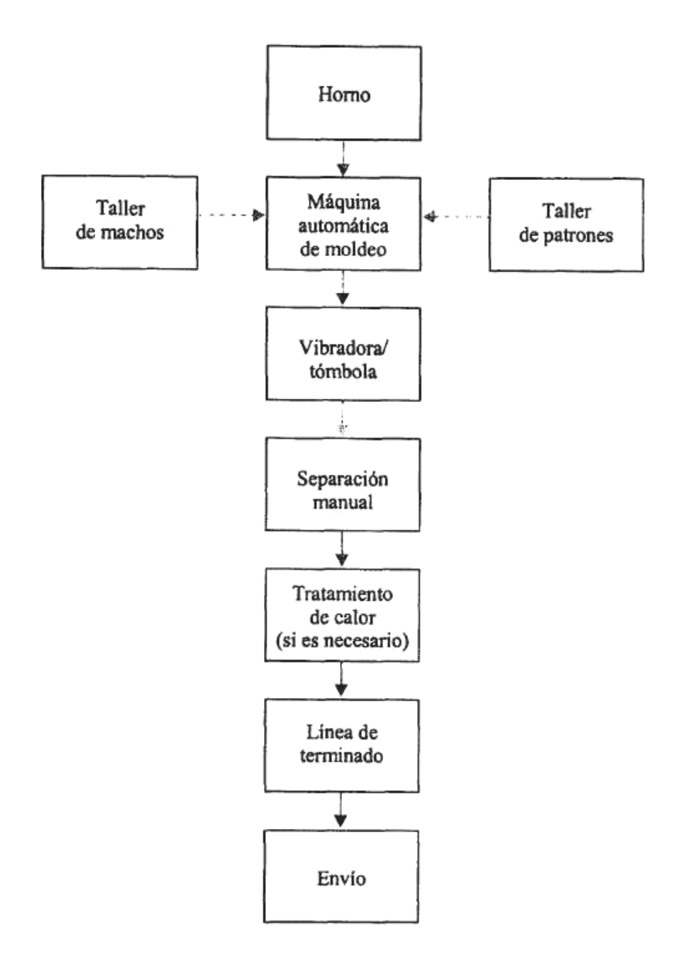


FIGURA 8-1
Operación típica en la fundidora

problema de la fundidora es establecer qué trabajo se hace en qué momento, es decir, programar la fundidora.

Morton y Pentico (1993) afirman: "programar es el proceso de organizar, elegir y dar tiempos al uso de recursos para llevar a cabo todas las actividades necesarias, para producir las salidas deseadas en los tiempos deseados, satisfaciendo a la vez un gran número de restricciones de tiempo y relaciones entre las actividades y los recursos". Esta definición implica que, si los recursos no están limitados, no existe el problema.

En el problema de la fundidora, los trabajos son las actividades y las máquinas son los recursos. Entonces un **programa** especifica el tiempo en el que comienza y termina cada trabajo en cada máquina, al igual que cualquier recurso adicional que se necesite. Una secuencia es un orden simple de trabajos; 3-1-2 indica que el trabajo 3 se hace primero, el 1 es el segundo y el 2 es el último. Si cada trabajo comienza tan pronto como es posible y se procesa sin interrupción para un tiempo dado de procesamiento, la secuencia determina los tiempos de inicio y terminación y, por lo tanto, determina la programación.

Determinar la "mejor" *secuencia parece* sencillo; sólo se enumeran todas las secuencias y se elige la que optimiza alguna medida de desempeño. Para 32 trabajos, el número de secuen-

cias posibles es 32!« 2.6 x 10^{35} secuencias posibles. Suponga que una computadora puede examinar mil millones de secuencias por segundo, ¡tomaría 8.4 x 10^{15} *siglos* enumerarlas todas! Una computadora que fuera un millón de veces más rápida todavía tardaría 8.4 x 10^9 siglos para examinarlas. Con sólo 16 trabajos existen más de 20 billones de programas, que a una tasa de mil millones de secuencias por segundo, podrían enumerarse más o menos en 8 meses. Muy pocos problemas de programación son tan sencillos. Los recursos adicionales (mano de obra, materia prima, etc.) y las dependencias entre trabajos (como la preparación) complican aún más el problema. El cuadro 8-1 presenta más detalles sobre la complejidad de los problemas de programación.

Esta explosión combinatoria muestra por qué es difícil resolver algunos problemas de programación y la razón por la que su estudio es interesante. El capítulo comienza con el examen del entorno de la programación, incluyendo trabajos, máquinas, medidas de desempeño y algoritmos. Luego se estudian los modelos de programación de una sola máquina; estos modelos se clasifican según la medida de desempeño. Después de los modelos de una sola máquina, se examinan los sistemas de programación de capacidad finita y se comenta sobre el software disponible y la evolución de la programación. Se concluye con un resumen del capítulo.

CUADRO 8-1

COMPLEJIDAD ALGORÍTMICA

Éste es un análisis intuitivo más que una descripción matemática precisa. Aunque las siguientes afirmaciones no son exactas, son bastante buenas para las consideraciones prácticas. Un tratamiento más preciso se puede encontrar en Garey y Johnson (1979).

Un algoritmo enciente es aquel en el que el esfuerzo dedicado a un problema está acotado por un polinomio cuyo grado es el tamaño del problema, como el número de trabajos. Un ejemplo sería el algoritmo para el árbol de expansión mínima, que se puede resolver a lo más en n^2 iteraciones, donde n es el número de arcos. Se dice que el algoritmo es de orden n cuadrada [O (n^2)]. Si el esfuerzo es exponencial [por ejemplo, 0(2")], el algoritmo no es eficiente. Un ejemplo sería el algoritmo de ramificación y acotamiento para variables 0/1, que puede requerir 2" nodos que deben explorarse.

El conjunto NP es el conjunto de todos los problemas que se pueden resolver por enumeración total. El conjunto P es un subconjunto de NP que consiste en todos los problemas para los que se conocen algoritmos eficientes. De nuevo, el árbol de expansión mínima es un ejemplo de un problema que pertenece a P. El conjunto NP-duro también es un subconjunto de NP, pero estos problemas son los que se ha probado que son los más difíciles en NP. De hecho, si alguien encontrara un algoritmo eficiente para cualquier problema en NP-duro, ese algoritmo se podría modificar para resolver todos los problemas en NP en tiempo polinomial, lo que haría al inventor rico y famoso. Parece poco probable que tal algoritmo llegue a existir. El problema del viajero se conoce como NP-duro.

Existen problemas en NP que en la actualidad no se pueden clasificar como pertenecientes a P o a NP-duro; es decir, que su complejidad no se conoce, y se llaman problemas abiertos.

Si un problema es NP-duro, a menos que todos los problemas en NP se puedan resolver polinomialmente, deberá recurrirse a algoritmos exponenciales (enumerativos) para obtener soluciones óptimas. Para ejemplos pequeños, o en algunos casos particulares, estos algoritmos enumerativos pueden ser aceptables. Conforme el problema crezca, la explosión combinatoria ' hará que sea imposible resolver el problema en un tiempo razonable. Otro enfoque es usar algoritmos heurísticos, que por lo general son buenos, pero no necesariamente proporcionan soluciones óptimas. Es común que los algoritmos heurísticos sean algoritmos polinomiales adapta-? dos para una estructura de problema específica.

SECCIÓN 1 EJERCICIOS

8.1. ¿Qué es programación? ¿De qué manera encaja con otras herramientas de planeación y control de la producción?

2 ANTECEDENTES

Esta sección proporciona antecedentes para los problemas, modelos y algoritmos de programación. Se analizará el entorno de la programación y se definirá la terminología y notación. Se usa la terminología clásica para programar los trabajos en las máquinas, pero éstos son términos genéricos y existen muchas aplicaciones fuera de la manufactura.

2.1 Trabajos

Los **trabajos** son actividades a realizar. En el ejemplo introductorio, los trabajos eran las órdenes de los clientes. En otras situaciones, los trabajos pueden ser pacientes para rayos X, clientes para servir en un restaurante, programas para correr en una computadora o aviones que van a aterrizar en un aeropuerto. Se supone que cada trabajo tiene un tiempo de procesado conocido. A menos que se establezca de otra manera, una vez que comienza a realizarse un trabajo, debe procesarse continuamente hasta terminarlo; es decir, no se permiten interrupciones. Puede tenerse una fecha de entrega en la que el trabajo debe estar terminado. Un trabajo también puede tener una fecha de inicio (o fecha de distribución de la orden), antes de la cual el procesamiento no puede comenzar.

Un trabajo puede depender de otro. Un tipo de dependencia ocurre cuando un trabajo debe preceder a otro; por ejemplo, un orificio no se puede roscar antes de perforarse. Otro tipo de dependencia ocurre cuando el tiempo necesario para un trabajo depende de que el trabajo anterior sea procesado. Si el trabajo 1 necesita un conjunto de herramientas en una máquina y el trabajo 2 necesita otro, entonces después de procesar el trabajo 1 debe cambiarse el herramental antes de procesar el trabajo 2. Si el trabajo 3 necesita las mismas herramientas que el trabajo 1, entonces la secuencia 1-2-3 requiere más preparaciones que la secuencia 1-3-2. Esto se conoce como **tiempo de preparación dependiente de la secuencia.** Si los tiempos de preparación no dependen de la secuencia, se pueden incluir en el tiempo de procesado. Se supone que los trabajos son independientes a menos que se diga lo contrario. Se supone además que, si debe procesarse un trabajo en más de una máquina, el trabajo sólo puede procesarse en una máquina a la vez; es decir, no se puede hacer otro trabajo al mismo tiempo.

2.2 Máquinas

Las máquinas procesan trabajos. En la manufactura, una máquina puede ser una máquina de moldeo automático. En situaciones fuera de la manufactura, una máquina puede representar un aparato de rayos X, un mesero en un restaurante, una computadora o una pista de aterrizaje. Los entornos de las máquinas se dividen en varias clases: una sola máquina, máquinas paralelas, talleres de producción continua, producción intermitente y plantas abiertas.

Para los **problemas en una sola máquina,** se tiene sólo una máquina y deben procesarse en ella todos los trabajos. La máquina puede procesar a lo más un trabajo a la vez. Una vez que

un trabajo se ha procesado en la máquina, se termina. El ejemplo introductorio considera que la línea de producción es una sola máquina.

Varias máquinas que pueden realizar el mismo tipo de procesamiento se llaman **máquinas paralelas.** Un trabajo se puede procesar en cualquiera de las máquinas, y una vez procesado por cualquiera de ellas, queda terminado. A menos que se diga lo contrario, se supone que todas las máquinas paralelas son idénticas. El tiempo para procesar un trabajo en una de varias máquinas idénticas es independiente de qué máquina lo haga. Un buen ejemplo de máquinas paralelas es un grupo de máquinas de moldeo por inyección, cada una de las cuales puede hacer varias partes de plástico diferentes.

Un **taller de producción continua** contiene máquinas diferentes. Cada trabajo debe procesarse en cada máquina exactamente una vez. Más aún, todos los trabajos siguen la misma ruta; esto es, deben visitar las máquinas en el mismo orden. Sin pérdida de generalidad, se pueden numerar las máquinas de manera que la 1 sea la primera, la 2 la segunda, y así sucesivamente. Un trabajo no puede comenzar su procesado en la segunda máquina hasta no terminar el de la primera. Las líneas de ensamble y las células son ejemplos típicos de producción continua.

Un **taller de producción intermitente** es más general que el de producción continua: cada trabajo tiene una ruta única. Los talleres de metalmecánica son con frecuencia intermitentes. Un trabajo debe pasar por el torno, después por un taladro y luego a un molino; mientras que otro irá al molino y luego al torno, pero nunca pasa por el taladro.

Los **talleres abiertos** son aquellos en los que los trabajos no tienen una ruta específica. Un ejemplo sería un taller mecánico (de reparación de automóviles). Los vehículos necesitan reparaciones múltiples que requieren distintos equipos, pero el orden de las reparaciones carece de importancia. Como los talleres abiertos son poco usuales en el mundo de la manufactura, no se analizarán.

2.3 Medición

El mejor programa implica una medida de desempeño. Maximizar la ganancia o minimizar el costo son medidas obvias. Desafortunadamente, es difícil estimar los parámetros financieros que relacionen un programa con costo o ganancia. Por otro lado, no se conocen algoritmos eficientes para optimizar la ganancia o el costo en modelos de programación de la producción.

Se usan objetivos sustitutos para aproximar algunos costos relevantes. Las medidas sustituías, por lo general, son funciones de tiempos de terminación para un programa dado. La mayoría de los sustitutos son medidas normales. Una **medida normal** es una función del tiempo de terminación, en la que el objetivo es minimizar la función y donde esa función sólo se incrementa si al menos un tiempo de terminación en el programa aumenta. Sean

n = número de trabajos que serán procesados
m = número de máquinas $p._{k}$ = tiempo de procesado del trabajo i en la máquina k ($p_{¡}sim$= 1)
$r_{¡}$ = tiempo de liberación de la orden (o fecha de distribución) del trabajo i $d_{¡}$ = fecha de entrega del trabajo i $w_{¡}$ = ponderación (importancia o valor) del trabajo i respecto a los otros trabajos

Dado un programa específico, se define para cada trabajo i

$C_{¡}$ - **tiempo de terminación** del trabajo i
$F_{¡} = C_{¡} - r_{¡}$, **tiempo de flujo** del trabajo i ($F_{¡} > 0$)

$L_i = C_i - d_i$, **retraso** del trabajo i ($L_i < 0$ denota anticipación)
$T_i = \text{máx}\{0, L_i\}$, **tardanza** del trabajo i
$E_i = \text{máx}\{0, -L_i\}$, **adelanto** del trabajo i
$\delta_i = 1$ si el trabajo i se atrasa (es decir, si $T_i > 0$)
$\delta_i = 0$ si el trabajo i está a tiempo o se adelanta (es decir, si $T_i = 0$)
$C_{\text{máx}} = \text{máx}_{i=1,n}\{C_i\}$, tiempo máximo de terminación de todos los trabajos o **lapso**
$L_{\text{máx}} = \text{máx}_{i=1,n}\{L_i\}$, **retraso máximo** de todos los trabajos
$T_{\text{máx}} = \text{máx}_{i=1,n}\{T_i\}$, **tardanza máxima** de todos los trabajos

Los objetivos sustitutos comunes incluyen minimizar el tiempo de flujo total, la tardanza total, el tiempo máximo de terminación, la tardanza máxima o el número de trabajos retrasados. Todos (excepto $C_{\text{máx}}$, $Z,_{\text{máx}}$ y T_{miK}) son simplemente sumas, sobre todos los trabajos, de las cantidades respectivas para cada trabajo. Si los trabajos no tienen todos la misma importancia, se puede calcular una medida ponderada multiplicando la medida por el peso apropiado para el trabajo.

Como la suma de los tiempos de procesamiento es constante, minimizar el lapso ($C_{\text{máx}}$) es equivalente a minimizar el tiempo ocioso o maximizar la utilización de las máquinas. Si los costos de mantener inventario dominan, el tiempo de flujo ponderado es una medida equivalente. Minimizar el tiempo de flujo es lo mismo que minimizar los tiempos de terminación, de retraso y los tiempos de espera de los trabajos. El tiempo de espera de los trabajos es inventario en proceso, de manera que minimizar el tiempo de flujo equivale a minimizar el número de trabajos en proceso. El tiempo de flujo ponderado corresponde al valor del inventario en proceso. El número de trabajos retrasados, la tardanza máxima y la tardanza total son medidas de servicio al cliente. Se pueden encontrar más detalles sobre costos y medidas sustituías en Rinnooy Kan (1976).

La mayoría de los problemas de programación suponen certidumbre en los datos; los tiempos de preparación son independientes del orden de procesado; todos los trabajos están disponibles de inmediato ($r_i = 0$); no existe precedencia entre los trabajos, y una vez que comienza el procesado de un trabajo, no se puede interrumpir.

En el capítulo 3 se hizo una presentación breve de los algoritmos de programación. Aquí se analizarán con más detalle. Un algoritmo es una "receta" para obtener una solución de un modelo. Un caso es un conjunto de datos específico para el modelo. Los algoritmos exactos proporcionan una solución óptima para todos los casos del problema. Los algoritmos heurísticos dan soluciones que se espera sean óptimas o cercanas a la óptima en cualquier caso.

¿Por qué no siempre se usan algoritmos exactos? Para muchos modelos de programación, los únicos algoritmos exactos que se conocen están basados en la enumeración, como el de ramificación y acotamiento o la programación dinámica. En los casos prácticos, la naturaleza combinatoria del problema de programación los hace computacionalmente prohibitivos.

Los algoritmos heurísticos se juzgan según su calidad y eficacia. La calidad es la diferencia entre una solución heurística y la óptima, mientras que la eficacia se refiere al esfuerzo realizado para obtener la solución. Ambas se pueden expresar teórica o empíricamente. Los heurísticos garantizan calidad y eficacia (es decir, cotas del peor caso en su desempeño).

La cota del peor caso sobre la eficacia determina el número de cálculos que debe realizar el algoritmo para *cualquier* problema práctico de un tamaño específico (de ahí el nombre de "peor caso"). Un buen algoritmo acota el número de cálculos por una función polinomial del tamaño del problema. Esto no se ha hecho para algunos algoritmos heurísticos que deben ser evaluados en forma empírica.

Para dar una justificación teórica de la calidad de un algoritmo heurístico, debe probarse matemáticamente que genera una solución dentro de cierto porcentaje de optimalidad, sin importar el problema particular que se está resolviendo. Igual que con la eficacia, si la calidad de un algoritmo heurístico no tiene justificación teórica, debe juzgarse de manera empírica.

Las pruebas empíricas consisten en generar y resolver muchos problemas prácticos y analizar los resultados. Se puede determinar el tiempo promedio para resolver el problema. Se puede encontrar la diferencia entre las soluciones heurística y óptima para problemas pequeños. Para casos en los que no se puede obtener la solución óptima, la solución heurística se compara con una cota sobre la solución óptima. Si existe una diferencia pequeña, la calidad del heurístico parece buena. La causa de una diferencia grande puede ser una cota débil o un heurístico pobre. Si el algoritmo heurístico tiene un buen desempeño en los casos de prueba, se hace la suposición de que se desempeña igual en otros casos. Esto puede no ser cierto para algún caso que difiera de las pruebas. Al ponerlo en marcha debe compararse la solución heurística con la solución actual.

Todos los algoritmos heurísticos que se estudian han tenido un buen desempeño en las pruebas. Estas pruebas empíricas están publicadas y se dan las referencias en la literatura sobre programación. Esto no es una garantía de soluciones buenas o ni siquiera que se puedan usar. La implantación de un algoritmo heurístico debe siempre ir precedida de pruebas con ejemplos "típicos" de la aplicación.

2.5 Gráficas de Qantt

A principios del siglo XX, Henry Gantt (1911) fue un pionero en el aumento de la productividad a través de una mejor programación. Una de sus primeras herramientas fue una representación pictórica de un programa, ahora llamada **gráfica** de **Gantt** en su honor. El propósito de la gráfica es desplegar el estado de cada recurso (casi siempre una máquina) en todo momento. El eje *x* representa el tiempo y el eje *y* consiste en una barra horizontal para cada máquina. Cuando tiene que procesarse un trabajo en una máquina, se coloca un rectángulo en la barra horizontal, que comienza en el tiempo de inicio del trabajo y concluye en su tiempo de terminación. Las gráficas de Gantt también se pueden construir colocando trabajos en lugar de máquinas en el eje *y*. El siguiente ejemplo muestra una gráfica de Gantt para un problema pequeño de programación.

Ejemplo 8-1. Gráfica de Gantt. La tabla 8-1 contiene los datos de un problema en un taller de producción intermitente con tres máquinas y cuatro trabajos. La primera operación del trabajo 1 toma 4 minutos y se realiza en la máquina 1; esto se denota por 4/1 en el renglón del trabajo 1 y la columna de la operación 1 de la tabla. Todas las órdenes de trabajo se mandan en el tiempo cero, y las fechas de entrega están dadas en la última columna.

Solución. Considere la secuencia 2-1-4-3 en la máquina 1, la secuencia 2-4-3-1 en la máquina 2 y la 3-4-2-1 en la máquina 3. La figura 8-2 describe este programa en una gráfica de Gantt. Cada bloque representa una operación de un trabajo; el número del trabajo aparece en el bloque. Los bloques en

TABLA 8-1
Datos del ejemplo de gráfica de Gantt

	Tiempo procesamiento/núm. máquina			Fecha de	Fecha de
Trabajo	**Operación 1**	**Operación 2**	**Operación 3**	**Distribución**	**Entrega**
1	4/1	3/2	2/3	0	16
2	1/2	4/1	4/3	0	14
3	3/3	2/2	3/1	0	10
4	3/2	3/3	1/1	0	g

blanco representan tiempo ocioso, que ocurre debido a que no hay trabajo disponible para procesar. La máquina 1 está ociosa del tiempo 0 al tiempo 1, porque el trabajo 2 se programó primero en la máquina 1, pero su primera operación es en la máquina 2. Hasta que el trabajo 2 termina el procesamiento en la máquina 2, no se puede procesar en la máquina 1.

Observe, en la figura 8-2, que la última operación del trabajo 1 se hace en la máquina 3 y se termina en el tiempo 14, esto es

$$C, = 14 \qquad \text{(en la máquina 3)}$$

Para los trabajos restantes

$$C_2 = 11 \qquad \text{(en la máquina 3)}$$
$$C_3 = 13 \qquad \text{(en la máquina 1)}$$
$$C_4 = 10 \qquad \text{(en la máquina 1)}$$

El lapso transcurrido es

$$C\text{^} = \text{máx}\{C_1,C_2,C_3,C_4\} = \text{máx}\{14,ll,13,10\} = 14$$

Recuerde que $F_¡$ - C, - r;, en este ejemplo, $r_¡$ = 0 para toda /, de manera que el tiempo de flujo y el tiempo de terminación son el mismo. El tiempo de flujo total (o suma de tiempos de terminación) es

$$\sum_i F_i = \sum_i C_i = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 = 14 + 11 + 13 + 10 = 48$$

El retraso de un trabajo es su tiempo de terminación menos su fecha de entrega; y su tardanza es el máximo entre cero y el retraso. Así,

$$L_1 = C_1 - d_1 = 14 - 16 = -2 \quad \text{y} \quad T_1 = \text{máx}\{0,\ C_1 - d_1\} = \text{máx}\ \{0,\ -2\} = 0$$
$$L_2 = C_2 - d_2 = 11 - 14 = -3 \quad \text{y} \quad T_2 = \text{máx}\{0,\ C_2 - d_2\} = \text{máx}\ \{0,\ -3\} = 0$$
$$L_3 = C_3 - d_3 = 13 - 10 = 3 \quad \text{y} \quad T_3 = \text{máx}\{0,\ C_3 - d_3\} = \text{máx}\ \{0,\ 3\} = 3$$
$$L_4 = C_4 - d_4 = 10 - 8 = 2 \quad \text{y} \quad T_4 = \text{máx}\{0,\ C_4 - d_4\} = \text{máx}\ \{0,\ 2\} = 2$$

El retraso total es

$$\sum_i L_i = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 = (-2) + (-3) + 3 + 2 = 0$$

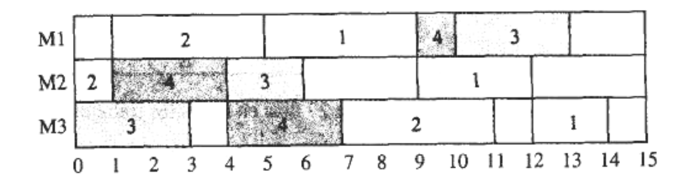


FIGURA 8-2
Gráfica de Gantt

y la tardanza total es

$$\sum_i T_i = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 = 0 + 0 + 3 + 2 = 5$$

La tardanza máxima es

$$T_{\text{máx}} = \text{máx}\{T_1, T_2, T_3, T_4\} = \text{máx}\{0, 0, 3, 2\} = 3$$

Los trabajos tardíos tienen $\delta_i = 1$, de manera que

$$T_1 = 0 \Rightarrow \delta_1 = 0$$
$$T_2 = 0 \Rightarrow \delta_2 = 0$$
$$T_3 > 0 \Rightarrow \delta_3 = 1$$
$$T_4 > 0 \Rightarrow \delta_4 = 1$$

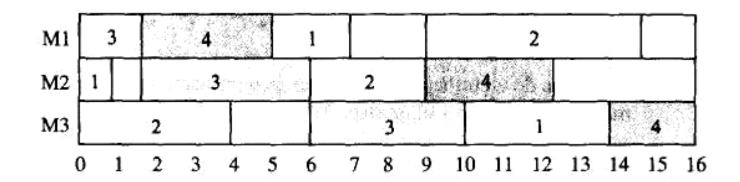
El número de trabajos tardíos es

$$N_T = \sum_i \delta_i = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 = 0 + 0 + 1 + 1 = 2$$

SECCIÓN 2 EJERCICIOS

8.2. Utilice el programa descrito en la siguiente gráfica de Gantt y (16, 10, 14, 8) como el vector de fechas de entrega para dar los valores de

d) Lapso
b) Tiempo de flujo total
c) Tardanza total
d) Retraso total
e) Número de trabajos tardíos



8.3. Encuentre un programa factible para los siguientes datos de un taller de producción intermitente:

	Tiempo de procesamiento			Ruta		
	Operación			Operación		
Trabajo	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**
1	**5**	**10**	**12**	**A**	**B**	**C**
2	**4**	**3**	**8**	**A**	**C**	**B**
3	**9**	**6**	**7**	**C**	**B**	**A**
4	**7**	**5**	**11**	**B**	**C**	**A**

Utilice una fecha de entrega de 27 días en todos los trabajos para determinar

d) Lapso
b) Tiempo de flujo total

c) **Tardanza total**
d) **Retraso total**
é) **Número de trabajos tardíos**

3 PROGRAMACIÓN DE UNA SOLA MÁQUINA

En esta sección se estudiarán los modelos para una sola máquina y sus soluciones. Estos modelos también son útiles para programar varias máquinas. El ejemplo de la fundidora dado en la introducción del capítulo representa una situación, en la que varias máquinas se consideran como una máquina agregada. Los modelos de una sola máquina también son adecuados para procesos en serie que contienen una máquina cuello de botella que restringe al sistema completo. Es importante generar un buen programa para la máquina cuello de botella porque su programación determina el programa para las máquinas que están antes y después del cuello de botella. Esta estrategia se analiza con más detalle en el capítulo 10.

Esta sección se divide según las medidas de desempeño. Primero se estudian algoritmos sencillos para varios modelos, cuyas medidas de desempeño son tiempo de flujo, retraso y tiempo de flujo ponderado. Después se dan algoritmos sencillos para minimizar el retraso máximo, la tardanza máxima y el número de trabajos tardíos. Desafortunadamente, minimizar el número ponderado de trabajos tardíos no tiene una solución elegante, pero se presenta un algoritmo heurístico. Minimizar la tardanza en una sola máquina es un problema difícil. Se proporcionan algoritmos sencillos para casos especiales y un algoritmo heurístico para el caso general y los casos ponderados. Después se estudian las soluciones para un modelo con sanciones tanto por tardanza como por adelanto, y luego se establece un marco de referencia para la implantación de estos algoritmos en un entorno dinámico. Se presentan un algoritmo heurístico y el de ramificación y acotamiento para tiempos de preparación dependientes de la secuencia. Por último, se dan procedimientos de búsqueda que pueden proporcionar buenas soluciones para la mayor parte de los modelos de programación de una sola máquina y que también pueden adaptarse a modelos de varias máquinas.

3.1 Tiempo de flujo mínimo

Suponga que está encargado de la programación en Newman Foundry (vea la sección 1). Un examen de los costos que quedan afectados por el programa indica que los costos del inventario en proceso dominan a los demás. La fundidora está produciendo artículos de costo alto que dejan la fábrica tan pronto como se terminan. Usted también descubre que el valor de todos los productos es casi el mismo, por lo que minimizar el tiempo de flujo total tiende a minimizar los costos de inventario totales. Ahora, su pregunta es, "¿cómo programo los trabajos de manera que se minimice el tiempo de flujo total?"

Se supone que todos los trabajos que deben programarse están disponibles en este momento, por lo que el tiempo de liberación de la orden es cero; esto significa que el tiempo de flujo es igual al tiempo de terminación. Será útil comenzar con un ejemplo específico del problema de

TABLA 8-2
Datos del problema de una sola máquina

Trabajo i	1	2	3	4	5
p_i	4	2	3	2	4

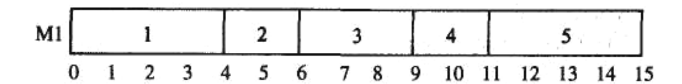


FIGURA 8-3
Secuencia natural para una máquina

programación. Considere los datos de la tabla 8-2. Suponga que el trabajo 1 se programa como el primero, el trabajo 2 como el segundo, etc. (es decir, el orden "natural"). Este programa se muestra en la figura 8-3. Observe que, en este caso, la secuencia de trabajos especifica un programa. Si el trabajo 2 sigue al 1, no tiene sentido retrasarlo, puesto que hacerlo sólo aumentaría el tiempo de flujo. No hay tiempo ocioso en el programa.

Para calcular el tiempo de flujo total, se suman los tiempos de terminación de todos los tra bajos. Para el primer trabajo es 4. El tiempo de terminación del segundo trabajo es su tiempo de procesado más el tiempo de procesado de todos los trabajos anteriores a él en el programa, esto es 4 + 2 = 6. Al continuar se encuentra que el tiempo de flujo total es 45. En general, si se tienen *n* trabajos programados, 1-2....... (n - 1) -*n,* el tiempo de flujo total *F* es

$$F = p_1 + (p_1 + p_2) + (p_1 + p_2 + p_3) + \cdots + (p_1 + p_2 + p_3 + \cdots + p_n)$$

Arreglando los términos se tiene

$$F = np_1 + (n-1)p_2 + (n-2)p_3 + \cdots + p_n$$

De esto parece lógico que el trabajo en la primera posición tenga el menor tiempo de procesado, porque entra en la cuenta *n* veces. De manera similar, se quiere que el trabajo en la segunda posición tenga el siguiente tiempo de procesado más corto, y se continúa colocándolos en orden no decreciente de tiempos de procesado con el más largo al último. Si hay empates, se rompen de manera arbitraria. La secuencia de trabajos ordenados del más corto al más largo es la secuencia con el **tiempo de procesado más corto** (TPC). Parece que así se minimiza el tiempo de flujo, pero el que sólo *parezca* no es suficiente. Por fortuna, este resultado se puede demostrar usando una técnica llamada intercambio adyacente por pares. Esta técnica es útil para probar muchos resultados de programación.

Teorema. La secuencia de TPC minimiza el tiempo de flujo en una sola máquina con tiempo de liberación de órdenes de cero.

Demostración. Para probar este resultado se supone que la secuencia óptima no es una secuencia TPC. Se construye una mejor que contradiga la suposición de que la secuencia óptima no es una secuencia TPC.

Suponga que el programa *S* minimiza el tiempo de flujo y que no está en el orden TPC. Si *S* no está en el orden TPC, debe existir un par de trabajos en *S*, digamos /' y *j* tales que i está programado inmediatamente antes de y,y $p_i > p_j$. Ahora considere el programa *S'*, que es el mismo que *S* excepto que los trabajos *i* y *j* se intercambiaron, de manera que *j* está programado inmediatamente antes de i. La figura 8-4 contiene las gráficas de Gantt de *S* y *S'*. Los trabajos en *B* y *A* están en la misma posición en los dos programas. Sean *t* el tiempo de terminación del último trabajo en *B; TF(B)* el tiempo de flujo total de los trabajos programados antes de i y *j, yTF(A)* el tiempo de flujo total para los tra-

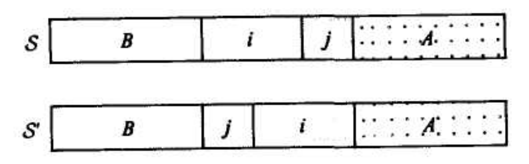


FIGURA 8-4
Programas que difieren en un intercambio por pares.

bajos posteriores a i y j. El tiempo de flujo total para S es

$$TF(S) = TF(B) + (t + p_i) + (t + p_i + p_j) + TF(A)$$

y el tiempo de flujo total para S' es

$$TF(S') = TF(B) + (t + p_j) + (t + p_j + p_i) + TF(A)$$

Restando se obtiene

$$TF(S) - TF(S') = p_i - p_j > 0$$

Esto implica que el tiempo de flujo total de 5" es menor que el de *S*, lo que contradice la suposición de que *S* es óptimo. Por lo tanto, un programa óptimo debe estar en el orden TPC, lo que completa la prueba.

Ejemplo 8-2. Tiempo de flujo en una sola máquina. Andre maneja SpeedCopy y tiene cinco trabajos en espera. Los tiempos de procesado están dados en la tabla 8-2. Al terminar los trabajos se notifica por teléfono a los clientes para que vengan a recogerlos. ¿En qué secuencia debe asignar Andre los trabajos para que el tiempo de espera de los clientes sea el menor posible?

Solución. Minimizar la espera total es equivalente a minimizar el tiempo de flujo; así, Andre debe usar el TPC. Aplicando TPC a los datos se obtiene la secuencia 2-4-3-1-5. Los tiempos de terminación para los trabajos son $C_2 = 2$, $C_4 = (2 + 2) = 4$, $C_3 = (2 + 2 + 3) = 7$, C, = (2+2 + 3 + 4) = 11 yC_5 = (2+ 2 + 3 + 4 +4) =15. Como todos los tiempos de liberación de órdenes son cero, el tiempo de flujo total es la suma de los tiempos de terminación, o sea (2 + 4 + 7 + 11 + 15) = 39. Observe que los trabajos 2 y 4 tienen el mismo tiempo de procesado y podrían intercambiarse sin afectar el objetivo. Esto también es cierto para los trabajos 1 y 5.

La secuencia TPC minimiza el tiempo total que tardan todos los trabajos en el sistema, ya que los tiempos en que se mandan las órdenes son cero y, por lo tanto, minimiza el tiempo de espera total, puesto que todos los tiempos de procesado son constantes. Esto hará felices a los clientes si están esperando su trabajo. **El** TPC también minimiza el número promedio de trabajos esperando ser procesados o, de manera equivalente, el inventario promedio de trabajo en proceso, medido en número de trabajos.

3.1.1 Retraso

Recuerde que el retraso de un trabajo *i* se define como $L_i = C_i - d_i$. El retraso total es

$$\sum_i L_i = \sum_i (C_i - d_i) = \sum_i C_i - \sum_i d_i$$

Como L d_i es constante para cualquier programa, al minimizar el tiempo de terminación total también se minimiza el retraso total. Entonces el TPC minimiza el retraso total. Con el retraso, la compensación por adelanto anula la sanción por tardanza, lo cual es poco común. Por ejemplo, muchos profesores sancionan el trabajo entregado tarde, pero pocos dan crédito adicional por entregarlo antes del tiempo límite.

3.1.*2* Tiempo de flujo ponderado

Un problema con el tiempo de flujo total mínimo es que debe suponerse que todos los trabajos tienen la misma importancia o valor, lo cual no siempre es cierto. Puede ser más importante terminar un trabajo a tiempo para un cliente constante que para un cliente eventual. Recuerde que

minimizar el tiempo de flujo es equivalente a minimizar el número de trabajos en inventario. Sin embargo, en general, el valor del inventario es más importante que su tamaño. Por fortuna, este problema también se puede manejar.

Sea w_i el peso o valor del trabajo *i*, donde un peso más grande significa que el trabajo es más importante o más valioso. En inventarios, el peso puede ser el valor del trabajo. El valor del inventario en cualquier punto en el tiempo es el valor de los trabajos que esperan ser procesados. Sea *[i]* el índice del trabajo programado en la i-ésima posición; si el trabajo 3 se programa primero, [1] = 3. El tiempo de terminación del trabajo programado en la j-ésima posición es la suma de los tiempos de procesamiento de los trabajos en las posiciones la *i*, o $C_{[i]}$ = p_m + $p_{[2]}$ + —H /?{,-]. Si las órdenes de todos los trabajos se mandan en el tiempo cero, el tiempo de terminación es también el tiempo que pasan en inventario. El valor total del inventario para un programa es

$$\sum w_i C_i = w_1 C_1 + w_2 C_2 + \cdots + w_n C_n$$

Como se vio en la sección 2.3, el tiempo de flujo se relaciona con el tiempo de espera del cliente; así, si la importancia de los clientes o de los trabajos no es la misma, la medida de peso es adecuada. Por ejemplo, el peso puede ser proporcional al volumen de negocios anual en dinero que un cliente hace con la compañía.

Si todos los trabajos tienen el mismo peso, la secuencia TPC es óptima. Si todos los trabajos tienen el mismo tiempo de procesado, parece natural realizar el de mayor peso primero, el segundo más grande después, etc. ¿Cómo pueden combinarse estas dos ideas?

Un trabajo con un tiempo de procesado pequeño y un peso alto debe programarse al frente, mientras que uno con un tiempo de procesado grande y un peso bajo debe programarse atrás. Una manera de hacer esto es observar la razón de tiempo de procesado entre peso y ordenar los trabajos según el orden no decreciente de estas razones. Por lo común, esto recibe el nombre de **secuencia de tiempo de procesado ponderado más corto** (TPPC). Aunque no se demostrará, el TPPC minimiza el tiempo de flujo ponderado y la prueba es análoga a la del TPC.

Ejemplo 8-3. Programación **TPPC.** Suponga, en el ejemplo 8-2, que no todos los trabajos tienen el mismo valor. En ese caso, al minimizar el tiempo de flujo no se minimiza el valor del servicio a los clientes, entonces se quiere usar un programa TPPC. Se puede usar el valor real en dólares de los trabajos, o determinar sus valores relativos. Suponga que los trabajos 1 y 4 tienen el mismo valor, los trabajos 3 y 5 tienen un valor tres veces más grande que 1 o 4, y el trabajo 2 vale cuatro veces más que 1 o 4. Entonces, los pesos que se usan son w, = 1, w_2 = 4, w_v = 3, w_4 = 1 y w_5 = 3. El cálculo de la razón del tiempo de procesamiento entre el peso da 4/1, 2/4, 3/3, 2/1 y 4/3. El trabajo 2 tiene el cociente más pequeño y se debe programar primero; la secuencia TPPC es 2-3-5-4-1, que da tiempos de terminación C, = 2, C, = 5, C_5 = 9, C, = 11 y C. = 15. El valor del tiempo de flujo ponderado es

$$\sum_{i=1}^{5} w_i F_i = 2 \times 4 + 5 \times 3 + 9 \times 3 + 11 \times 1 + 15 \times 1 = 76$$

3.2 Tardanza máxima y retraso máximo

Si la satisfacción del cliente es la medida de desempeño importante, se deben tomar en cuenta las fechas de entrega. La secuencia TPC no considera estas fechas de entrega, por lo que los programas que son buenos respecto al tiempo de flujo, pueden ser malos para una medida

orientada a las fechas de entrega. Una medida orientada a las fechas de entrega es la tardanza máxima, $7_{máx}$. Aquí se quiere que el trabajo más tardío tenga la menor tardanza posible. Si el volumen de los gritos de un cliente es proporcional a la tardanza de su trabajo, minimizar la tardanza máxima es hacer que el grito más sonoro sea tan bajo como sea posible (Woolsey y Swanson, 1975).

¿Cómo se ordenan los trabajos para minimizar la tardanza máxima? Sin duda, las fechas de entrega deben tomar parte, y del análisis del tiempo de flujo parece razonable colocar primero el trabajo con la fecha de entrega más cercana, después la siguiente más cercana, etc. Esta secuencia se llama de **fecha de entrega más cercana** (FEC). De nuevo, la intuición es correcta y la FEC minimiza T_{mix}. La demostración es similar a la prueba de que TPC minimiza la suma de los tiempos de terminación —se supone un programa en el que FEC no es óptimo, y se usa el intercambio de pares adyacentes para demostrar que el programa FEC es mejor—. El mismo argumento demuestra que la secuencia FEC minimiza $Z._{máx}$.

Ejemplo 8-4. T_{max} mínimo. Suponga que los clientes tienen fechas de entrega (16,10,7,7,5) para los cinco trabajos del ejemplo 8-2. La secuencia FEC sería 5-3-4-2-1, y la tardanza de los trabajos es (0,0,2, 1,0), lo que da r_{mfa}= 2.

3.3 Número de trabajos tardíos

Si es posible tener todos los trabajos a tiempo, la secuencia FEC no tiene trabajos tardíos. Sin embargo, si no todos los trabajos pueden estar a tiempo, uno de los problemas con FEC es que, aunque ningún trabajo salga demasiado tarde, muchos (o incluso todos) pueden salir algo tarde. Cuando domina la componente de costo fijo de los trabajos retrasados, se puede querer tener tantos trabajos a tiempo como sea posible o, de manera equivalente, minimizar el número de trabajos tardíos. Para resolver este modelo se usó el algoritmo de Hodgson. Se da un análisis intuitivo y después se hace una presentación mucho más formal.

Primero se colocan los trabajos en el orden FEC y se calcula su tardanza. Si todos los trabajos van a tiempo, se termina; de otra manera se encuentra el primer trabajo tardío en la secuencia, al menos uno *debe* estar tarde en cualquier secuencia. Es necesario determinar cuál de los trabajos de este conjunto mover y en qué lugar de la secuencia debe colocarse. Como sólo se trata de minimizar el número de trabajos tardíos, cualquiera de ellos puede ponerse al final del programa, sin importar qué tan tarde esté. Esto permite que los otros trabajos tengan tiempos de terminación más cortos y, se espera, estén más a tiempo. Al mover el trabajo con el tiempo de procesado más largo, se reducen los tiempos de terminación de los trabajos restantes lo más posible. Por lo tanto, de los trabajos en este conjunto, se quita el trabajo con tiempo más largo y se coloca al final de la secuencia. Los empates se pueden romper de manera arbitraria.

Recuerde que *[i]* es el índice del trabajo programado en la posición *i*. El tiempo de terminación para el trabajo programado en la posición *i* es la suma de los tiempos de procesamiento de los trabajos en las posiciones 1 a i,o $C_{[(]} = p_m + p_{[2]}$ + •" **+/?[,]** La tardanza es $T_{[t]}$ = máx{0, C_m - $d_{[n}$}. El algoritmo formal es:

Paso 1. Se calcula la tardanza para cada trabajo en la secuencia FEC. Se hace N_T = O, sea *k* la primera posición que contiene un trabajo tardío. Si ningún trabajo está tarde, se va al paso 4.

Paso 2. Se encuentra el trabajo con el tiempo de procesado más largo en las posiciones 1 a

k. Sea p_m = máx$_{f\ =\ u}$ /?$_{[f]}$; entonces j^* = *[j]* es el índice del trabajo con el tiempo de procesado más largo entre los primeros *k* trabajos.

Paso 3. Se quita el trabajo j^* de la secuencia, se hace $N_T = N_T$+ l,y se repite el paso 1.

Paso 4. Los N_T trabajos que se quitaron se colocan al final de la secuencia, en cualquier orden. Esta secuencia minimiza el número de trabajos tardíos.

El algoritmo es intuitivo; pero la prueba es bastante complicada y por tanto no se dará aquí.

Ejemplo 8-5. Algoritmo de Hodgson. Considere el ejemplo anterior. Recuerde que la secuencia FEC era 5-3-4-2-1, de manera que [1] = 5, [2] = 3, [3] = **4,** [4] = 2 y [5] = 1.

Paso 1. N_T =0, los tiempos de terminación son (4,7,9,11,15) y las tardanzas son (0,0,2,1,0). Existe un trabajo tardío. El trabajo 4, en la tercera posición, es el primero; así, $k = 3$.

Paso 2. Los tiempos de procesado de los trabajos 5,3 y 4 (los trabajos en las primeras tres posiciones) son 4, 3 y 2, respectivamente. El tiempo más largo de procesado es 4; así, $j^* = 5$.

Paso 3. Se quita el trabajo 5 de la secuencia, se hace $N_T = 0 + 1 = 1$ y se va al paso 1.

Paso 1. La nueva secuencia es 3-4-2-1, con tiempos de terminación (3,5,7,11) y la tardanza es (0,0, 0, 0). Como todos los trabajos van a tiempo, se va al paso 4.

Paso 4. El programa que minimiza el número de trabajos tardíos es 3-4-2-1 -5, y como sólo tiene un trabajo tardío $N_T = 1$.

3.3.1 Número ponderado de trabajos tardíos

Si los trabajos no son igualmente importantes, se puede dar un peso a cada uno, como se hizo con el tiempo de flujo, para tratar de minimizar el peso total de los trabajos tardíos. Como este problema es *NP-duro,* parece poco probable que exista un algoritmo para este modelo. Un heurístico obvio es aplicar el algoritmo de Hodgson, quitando, entre los primeros *k* trabajos, aquellos con el mayor cociente de tiempo de procesado entre el peso, en lugar del tiempo de procesado más largo.

Ejemplo 8-6. Número ponderado de trabajos tardíos. Considere el ejemplo 8-5 con los pesos del ejemplo 8-3. Minimice el número ponderado de trabajos tardíos.

Solución. Recuerde que la secuencia FEC era 5-3-4-2-1, de manera que [1] = 5, [2] = 3, [3] = 4, [4] = 2 y [5] = 1.

Paso 1. Los tiempos de terminación son (4,7,9,11,15) y la tardanza es (0,0,2,1,0). Hay un trabajo tardío. El trabajo 4, en la tercera posición, es el primero, así, $k = 3$.

Paso 2. Los cocientes de tiempo de procesado entre peso de los trabajos 5,3 y 4 (los que están en las primeras tres posiciones) son 4/3,3/3 y 2/1, respectivamente. El trabajo 4 tiene el cociente más grande (2/1), por lo que $j^* = 4$.

Paso 3. Se quita el trabajo 4 de la secuencia y se va al paso **1**.

Paso 1. La nueva secuencia es 5-3-2-1, con tiempos de terminación (4,7,9,13) y tardanza (0,0, 0,0). Todos los trabajos están a tiempo, se va al paso 4.

Paso 4. El programa 5-3-2-1 -4 tiene un trabajo tardío -el trabajo 4 con peso 1- de manera que el número ponderado de trabajos tardíos es $w_4 = 1$.

Este programa, en general, no minimiza el número ponderado de trabajos tardíos, pero con frecuencia proporciona buenas soluciones (Villarreal y Bulfin, 1983).

3.3.2 Tiempo de flujo mínimo sin trabajos tardíos

Es claro que se desea minimizar el inventario en proceso y satisfacer las fechas de entrega a los clientes. Si las fechas de entrega son más importantes, se querrá tener un tiempo de flujo lo más pequeño posible para mantener todos los trabajos a tiempo. Recuerde que, si es posible tener todos los trabajos a tiempo, la secuencia FEC lo hará.

Para que todos los trabajos estén a tiempo, el último trabajo debe estar a tiempo. El **conjunto programable** de trabajos contiene todos aquellos que tienen fechas de entrega mayores o iguales que la suma de todos los tiempos de procesado. Si no existen tales trabajos, no todos los trabajos pueden estar a tiempo. Entre los trabajos programables, se elige el que tiene el tiempo de procesamiento más largo y se programa como el último. Se quita el trabajo programado del problema y se resuelve el problema de programación de nuevo con los trabajos restantes. El resultado es el programa óptimo que se construye eligiendo primero el último trabajo, después el penúltimo, etc. Se ilustra esto con el siguiente ejemplo.

Ejemplo 8-7. Tiempo de flujo mínimo sin trabajos tardíos. Para tener todos los trabajos a tiempo, se deben cambiar las fechas de entrega en el ejemplo 8-5. Suponga que las nuevas fechas son (16, 11,10,9,12). Recuerde que los tiempos de procesado eran (4,2,3,2,4) y la suma de estos tiempos es 15.

Solución. Sólo el trabajo 1 tiene una fecha de entrega mayor que 15 ($d_i = 16$), de manera que es el último en el programa (x-x-x-x-1). Se resta su tiempo de procesado ($p_i = 4$) de 15 para obtener la suma de los tiempos de los trabajos restantes, que es 11. Los trabajos 2 y 5 tienen fechas de entrega al menos iguales que 11 ($d_2 = 11$, $d_5 = 12$), se elige el trabajo 5, que tiene tiempo de procesado mayor ($p_5 = 4 > 2 = p_2$) para programarse al final de los trabajos restantes (x-x-x-5-1). Al restar el tiempo de procesado del trabajo 5, el tiempo total de los trabajos no programados es 7. Todos los trabajos que quedan tienen fechas de entrega iguales o posteriores a 7, entonces se elige el que tiene el mayor tiempo de procesado, que es el trabajo 3, y se obtiene la secuencia parcial x-x-3-5-1. Si se continúa se obtiene el programa 2-4-3-5-1, que tiene todos los trabajos a tiempo y da un tiempo de flujo mínimo de 39. Observe que este programa es un programa TPC, lo cual no siempre ocurrirá.

Parece obvio que este procedimiento se puede generalizar fácilmente al tiempo de flujo ponderado, programando como último el trabajo con el menor cociente del peso entre el tiempo de procesado. Aun cuando éste es un buen algoritmo heurístico, se pueden generar contraejemplos que muestran que el programa obtenido no es óptimo.

danza mínima

Tal vez ha observado que cuando se rninimiza el número de trabajos tardíos o la máxima tardanza, la tardanza total del programa puede ser bastante grande. Para T_{mix} todos los trabajos pueden estar tarde, o al minimizar N_T el resultado es trabajos tardíos con mucha tardanza. Una medida alternativa puede minimizar la tardanza total. Si no todos los trabajos son igualmente importantes, la medida adecuada sería minimizar las tardanzas ponderadas.

Existen casos especiales en los que es sencillo encontrar una solución óptima. Suponga que todos los trabajos tienen pesos iguales. Si todos ellos tienen una fecha de entrega común, la secuencia TPC minimiza la tardanza. De manera similar, si todos los trabajos tienen un mismo tiempo de procesado, la secuencia FEC es óptima. De aquí, si las secuencias TPC y FEC son idénticas, producen una secuencia de tardanza óptima. Si la secuencia FEC produce una se-

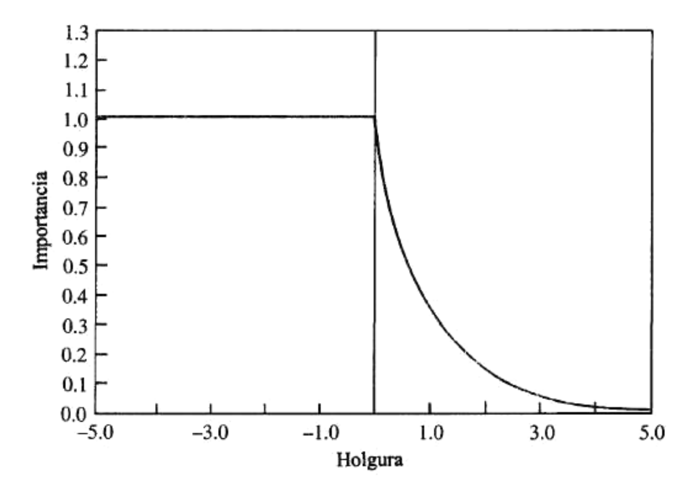


FIGURA 8-5
Importancia del RPTP

cuencia con a lo más un trabajo tardío, la secuencia minimiza la tardanza total. Por último, si todos los trabajos son tardíos, la tardanza equivale al tiempo de flujo y la secuencia TPC es óptima. Un argumento de intercambio por pares verifica estos resultados.

Desafortunadamente, no se conoce un algoritmo *eficiente* que pueda resolver de manera óptima el problema general de la tardanza en una sola máquina. Más aún, se puede demostrar que el problema es *NP-duro,* aunque todos los pesos sean iguales. Así, debe recurrirse a algoritmos enumerativos, como los de ramificación y acotamiento o programación dinámica, o conformarse con las soluciones heurísticas. Se presenta un procedimiento heurístico de despacho (Rachamadugu y Morton, 1982) para el problema ponderado que ha tenido un buen desempeño en pruebas empíricas.

Si todos los trabajos son tardíos, minimizar la tardanza ponderada es equivalente a minimizar el tiempo de terminación ponderado, lo cual se logra con la secuencia TPPC. Aquí se usa la **razón peso entre tiempo de procesado** (RPTP), que es el recíproco de la razón tiempo de procesado entre peso. Elegir la RPTP más grande equivale a elegir el menor cociente del tiempo de procesado entre el peso, y produce la secuencia TPPC.

Defina la holgura de un trabajo i como

$$S_i = d_i - p_i - t$$

donde t es el tiempo real. Para problemas estáticos, $t = 0$, y S, es la fecha de entrega menos el tiempo de procesamiento. Un trabajo no debe tener todo el "crédito" de RPTP si su holgura es positiva, porque podría retrasarse y todavía tener tardanza cero. De hecho, mientras más probable sea que esté a tiempo (es decir, entre más grande sea su holgura), menor atención debe recibir de RPTP. La figura 8-5 muestra las características de esta medida de importancia. Defina

$$S_i^+ = \text{máx}\{0, S_i\}$$

S_i es cero si su holgura es negativa, y el trabajo es tardío si sé programa ahora, entonces, la importancia de su RPTP debe ser alta. Los trabajos con S* pequeño están cerca de la tardanza, y su prioridad debe ser cercana al valor completo de RPTP. Si S_i es muy grande, pasará mucho tiempo para que sea tardío, por lo que su RPTP no debe contar mucho, si es que cuenta algo. La función exponencial *e~** se comporta de esta manera si x es una función de S_i.

La función exponencial proporciona el valor de RPTP para un trabajo con holgura no positiva, porque *e*° = 1. La tasa a la que *e*~^{x} decrece (es decir, a la que descuenta la RPTP) depende del valor de *x*. Si un trabajo tiene holgura 1, su peso podría ser eT^1 = 0.37, y una holgura de 3 da e"^{3} = 0.05, que no es muy grande, entonces se necesita sustituir la holgura por una medida más significativa. Se define

$$p_{\text{prom}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} p_i$$

como el tiempo promedio de procesado de los trabajos. La razón S^+*j/p*$_{pTOm}$ es el número promedio de las duraciones de los trabajos hasta que el trabajo *j* es tardío. Ésta es una cantidad más significativa que la holgura. Ahora, si un trabajo tiene *S]/'p*$_{pmm}$ = 1, se puede demorar un periodo igual a la duración promedio del trabajo y todavía estar a tiempo; esto justifica un peso tan pequeño como *e*~^{l} = 0.37. Conforme la holgura crece, el multiplicador decrece exponencialmente; una holgura del doble del tiempo promedio de procesado tiene multiplicador 0.14, y del cuádruple, 0.02.

Estos multiplicadores pueden no decrecer lo suficientemente rápido. Rachamadugu y Morton (1982) sugieren multiplicar el tiempo de procesado promedio por el factor Kpara apresurar la reducción de la importancia dada por RPTP. Se determina un valor por experimentación; Rachamadugu y Morton recomiendan K = 2 para problemas estáticos de una sola máquina.

Se define la prioridad de un trabajo i como

$$\gamma_i = \left(\frac{w_i}{p_i}\right) e^{-[S_i^+/(\kappa p_{\text{prom}})]}$$

Se calcula la prioridad *y¡* para cada trabajo y secuencia de trabajos en orden descendente de prioridades. El siguiente ejemplo ilustra el procedimiento.

Ejemplo 8-8. Heurístico de R&M. Jamar Knight es el propietario de Pensacola Boat Construction. Actualmente tiene 10 barcos bajo contrato. Dio a todos los clientes fechas de entrega proyectadas para sus barcos. Si PBC entrega un barco después de la fecha convenida, debe pagar al cliente una sanción proporcional tanto al valor del barco como a su tardanza. Dadas las estimaciones de cuánto tiempo toma construir cada barco, ¿cómo debe Jamar programar el trabajo para minimizar la sanción que debe pagar?

TABLA 8-7
Datos para Pensacola Boat Construction

Trabajo	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
p_i	8	12	6	10	3	11	9	11	13	7
w_i	4	1	6	5	1	4	5	9	8	1
d_i	26	28	32	35	38	48	50	51	53	64

Solución. Se supone que la sanción es una tardanza ponderada, donde el peso es una medida del valor del barco. Todos los tiempos están en semanas, y las fechas de entrega están en semanas a partir del tiempo cero (ahora). Se elige K = 2. Los datos se presentan en la tabla 8-3. La prioridad del heurístico R&M para el trabajo 1 es

$$\gamma_1 = \left(\frac{w_1}{p_1}\right) e^{-[S_1^+/(\kappa p_{\text{prom}})]} = \left(\frac{4}{8}\right) e^{-[(26-8)/(2\times 9)]} = 0.5e^{-1.0} = 0.18$$

TABLA 8-4
Cálculo de prioridades para Pensacola Boat Construction

Trabajo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p_i	8	12	6	10	3	11	9	11	13	7
w_i	4	1	6	5	1	4	5	9	8	1
d_i	26	28	32	35	38	48	50	51	53	64
w_i/p_i	0.5	0.08	1.00	0.50	0.33	0.36	0.56	0.82	0.62	0.14
S_i^+	18	16	26	25	35	37	41	40	40	57
$S_i^+/\kappa p_{prom}$	1.00	0.89	1.44	1.39	1.94	2.06	2.28	2.22	2.22	3.17
γ_i	0.18	0.03	0.24	0.12	0.05	0.05	0.06	0.09	0.07	0.01

Los cálculos para el resto de los trabajos están dados en la tabla 8-4. Al ordenar los trabajos según los valores no decrecientes de y,, se obtiene el programa de la tabla 8-5. La tardanza ponderada de este programa es 230. Para comparar este programa con otras reglas para despachar, vea la tabla 8-6. La tardanza ponderada está dada por las reglas TPC, FEC, PPM (primero el peso mayor), TPPC y R&M. R&M es claramente la mejor para estos datos, pero se pueden construir ejemplos para los que ninguno de estos procedimientos para despachar da un mejor programa que los otros.

Emmons (1969) desarrolló las condiciones que algún programa de tardanza óptima debe satisfacer. La más útil es que si $p_i < p_j$, $d_i < d_j$ y $w_i > w_j$, entonces el trabajo i precede al trabajo j en al menos un programa óptimo. Si se examinan los datos para PBC, se ve que el trabajo 1 tiene el menor tiempo de procesamiento y fecha de entrega y un peso más grande que el trabajo 2, por lo que el trabajo 1 precede al trabajo 2 en algún programa óptimo. De la misma manera, se ve que el trabajo 1 también precede al trabajo 6; el trabajo 3 precede a los trabajos 4, 7 y 10; el trabajo 4 precede al 6; el trabajo 5 precede al 10, y el 8 precede al 9. Aun cuando el programa R&M satisface todas las restricciones de precedencia para este problema en particular, no siempre lo hace. (El lector puede construir un problema para el que R&M viole las condiciones de Emmons.)

TABLA 8-5
La secuencia R&M para PBC

Trabajo	3	1	4	8	9	7	5	6	2	10	Suma
γ_i	0.24	0.18	0.125	0.09	0.07	0.06	0.05	0.047	0.03	0.01	
p_i	6	8	10	11	13	9	3	11	12	7	90
C_i	6	14	24	35	48	57	60	71	83	90	
d_i	32	26	35	51	53	50	38	48	28	64	
T_i	0	0	0	0	0	7	22	23	55	26	133
w_i	6	4	5	9	8	5	1	4	1	1	
w_iT_i	0	0	0	0	0	35	22	92	55	26	230

TABLA 8-6
Solución de despacho para PBC

Regla	$\sum w_iT_i$
TPC	535
FEC	496
PPM	388
TPPC	299
R&M	230

3.5 Adelanto y tardanza mínimos con fecha de entrega común

Un trabajo que termina antes de su fecha de entrega puede ser tan costoso como el que está listo después de esa fecha. En ese caso, una medida adecuada puede ser la suma del adelanto y la tardanza:

$$Z = \sum_{i=1}^{n}(E_i + T_i)$$

Ésta no es una medida normal. En consecuencia, el tiempo ocioso puede mejorar el objetivo y una secuencia no necesariamente implica un programa. Ahora se examinará el caso especial de una fecha de entrega común.

Suponga que $d_j = D$ para toda j, que ocurre si todos los trabajos se mandan en el mismo camión o si todos forman la misma orden. Se numeran los trabajos en el orden TPL, es decir, $p_1 \geq p_2 \geq \cdots \geq p_n$. Se tienen dos casos, fecha de entrega no restringida y fecha de entrega restringida. Para el caso no restringido se sabe (Baker, 1995) que:

1. No hay tiempo ocioso insertado entre trabajos, pero puede haber tiempo ocioso al principio del programa.
2. Domina un programa en forma de V (trabajos a tiempo en TPL, trabajos tardíos en TPC).
3. Algún programa óptimo tiene un trabajo, digamos j^*, con $C_{j*} = D$.
4. En algún programa óptimo, j^* eá el trabajo cuya posición es el menor entero mayor o igual que $n/2$; es decir, $[j^*] = \lceil n/2 \rceil$. Si n es par se tiene el mismo número de trabajos antes y después de la fecha de entrega. Si n es impar hay un trabajo más después de la fecha de entrega que antes.

Sea
$$\Delta = p_1 + p_3 + p_5 + \cdots + p_{j*}$$

Si $D \geq \Delta$, el problema es no restringido y los trabajos se programan de manera que $C_r = D$. La secuencia

1-3-5-7- . . . -n- . . . -6-4-2

es una de muchas secuencias óptimas. El programa puede necesitar tiempo ocioso al principio para que $C_{j*} = D$.

Ejemplo 8-9. Adelanto/tardanza para MetalFrame. MetalFrame tiene 10 trabajos distintos para un cliente en particular. En cuanto todos están terminados, se colocan en un camión para mandarlos al cliente. La compañía trata de entregar las órdenes en 10 días hábiles. Terminar un trabajo antes causa problemas, porque se cuenta con poco espacio para almacenar producto terminado antes de enviarlo. Terminar después de los 10 días hábiles reduce el servicio al cliente. Casi todos en Metal-Frames piensan que la sanción por terminar antes es más o menos la misma que por terminar con retraso. Los trabajos y sus tiempos de procesado (en horas) se dan en la tabla 8-7.

TABLA 8-7
Datos de adelanto/ tardanza para MetalFrame

Trabajo	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Tiempo de procesado	8	18	11	4	15	5	23	25	10	17

TABLA 8-8
Cálculo de fechas de entrega no restringidas para MetalFrame

Trabajo (orden LPT)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tiempos de procesado	25	23	18	17	15	11	10	8	5	4
Secuencia	1	3	5	7	9	10	8	6	4	2
Tiempos	25	18	15	10	5	4	8	11	17	23
Suma de tiempos	25	43	58	68	73	77	85	96	113	136
Terminación	32	50	65	75	80	84	92	103	120	143
Adelanto	48	30	15	5	0	0	0	0	0	0
Tardanza	0	0	0	0	0	4	12	23	40	63

Solución. Este problema se puede modelar como de una sola máquina con el objetivo de minimizar la suma del adelanto y la tardanza. La fecha de entrega común para los trabajos es de 80 horas (hábiles) a partir de ahora. La tabla 8-8 contiene los resultados de los cálculos para la secuencia óptima de trabajos.

Primero se ordenan los trabajos de forma que el trabajo 1 tiene el tiempo de procesado más largo, el trabajo 2 tiene el segundo más largo, etc. Los tiempos de procesado ordenados están dados en el primer renglón de la tabla 8-8. Aquí,

$$[j^*] = [10/2] = 5$$

El trabajo 9 está en la quinta posición de la secuencia en V dada en el segundo renglón, por lo que $j^* = 9$ y

$$\Delta = p_1 + p_3 + p_5 + p_7 + p_9 = 25 + 18 + 15 + 10 + 5 = 73$$

Esta suma se da en el renglón 4. Como $D \geq \Delta$, se trata de un problema no restringido y se quiere tener $C_9 = 80$, de manera que se comienza el programa en el tiempo 7, que da los tiempos de terminación en el renglón 5. Para terminar, el adelanto y la tardanza de este programa óptimo se dan en los dos últimos renglones. La sanción total y su suma es 240. Otros programas producen la misma sanción.

Del análisis y el ejemplo, se puede intuir que si se puede establecer la fecha de entrega, la mejor opción es A.

Suponga que $D \not\geq \Delta$; éste es un problema restringido y es *NP-duro.* Los hechos 1 y 2 para el caso no restringido todavía se cumplen, pero 3 y 4 no. Un trabajo puede quedar alrededor de la fecha de entrega si comienza antes de D y termina después. Un programa óptimo puede comenzar con tiempo ocioso.

Sundararaghavan y Ahmed (1984) desarrollaron y probaron un procedimiento heurístico, el cual construye un programa en forma de V comenzando en el tiempo cero. El trabajo más largo se coloca al principio del programa si hay más tiempo entre cero y la fecha de entrega, que entre la fecha de entrega y la suma de los tiempos de procesado. De otra manera se coloca al final. Este procedimiento se repite hasta que se colocan todos los trabajos en la secuencia. Formalmente se tiene

Paso 0. Se establece $B = D$; $A = \sum_j p_j - D$; $k = b = 1$; $a = n$.

Paso 1. Si $B > A$

se asigna el trabajo k a la posición b

$b \leftarrow b + 1$

$B \leftarrow B - p_k$

de otra manera

se asigna el trabajo k a la posición a a

<r- a - 1

A <- A - p_k

Paso 2. Se hace k <- £ + 1. Si k < n se va al paso 1.

Baker (1995) demuestra que si más de la mitad de los trabajos están adelantados, el programa se puede mejorar retrasando su inicio de manera que el último trabajo adelantado termine en el tiempo D.

Ejemplo 8-10. Adelanto/tardanza restringidos en **MetalFrame.** Suponga que la política de entrega en MetalFrame es de siete días hábiles; es decir D = 56 horas. ¿Cuál es el programa adecuado?

Solución. De los cálculos anteriores, este problema tiene una fecha de entrega restringida. Se usa el algoritmo de S&A (Sundararaghavan y Ahmed, 1984) para resolver el problema. La tabla 8-9 muestra los cálculos en cada paso. La secuencia que se obtiene es 2-5-7-9-10-8-6-4-3-1; si el primer trabajo comienza en cero, el vector de tiempo de terminación es (23,38,48,53,57,65,76,93,111,136). Los primeros cuatro trabajos están adelantados; de manera que el programa no se puede mejorar retrasando el inicio para que el último trabajo adelantado (8, C_8 = 53) termine en la fecha de entrega 56. Esta secuencia da un programa con adelanto y tardanza de 264. No es necesariamente el programa óptimo.

TABLA 8-9
Pasos del algoritmo heurístico de S&A

		B	***b***	***A***	***a***	**Posición**
k	*Pk*	56	1	80	10	—
1	25	56	1	80	10	10
2	23	56	1	55	9	1
3	18	33	2	55	9	9
4	17	33	2	37	8	8
5	15	33	2	20	7	2
6	11	18	3	20	7	7
7	10	18	3	9	6	3
8	8	8	4	9	6	6
9	5	8	4	1	5	4
10	4	3	5	1	5	5

El heurístico existe para problemas en los que el costo del adelanto difiere del costo de la tardanza, donde las sanciones por adelanto/tardanza dependen del trabajo, y para fechas de entrega distintas. Vea más información en Baker (1995).

3.6 Programa dinámico

La mayor parte de este capítulo maneja problemas **estáticos;** es decir, todos los datos se conocen desde el principio. Si éste no es el caso, se trata de un problema de programación **dinámica.** Por ejemplo, un programa se crea para un conjunto de trabajos, pero mientras que se están procesando, llegan más trabajos. Se comenzará por examinar un problema estático con fechas de distribución distintas de cero. Este enfoque se extiende a problemas dinámicos.

Si no todos los tiempos de liberación son cero, el 1T*G no necesariamente minimiza el tiempo de flujo. Si el trabajo más corto tiene una fecha de liberación mayor, la máquina estaña ociosa mientras espera procesar primero ese trabajo, mientras que un trabajo más largo con fecha de liberación anterior puede completarse antes de la fecha de liberación del trabajo más corto. Suponga que el único trabajo disponible tiene un tiempo de procesado largo y que llegan varios trabajos cortos un periodo más tarde. Sería mejor no programar ningún trabajo y dejar la máquina ociosa, hasta que lleguen los trabajos cortos. Entonces se podrían programar éstos antes que los largos y reducir el tiempo de flujo.

Él mejor programa para estos problemas no es evidente y debe recurrirse a enfoques heurísticos o enumerativos para su solución. El **conjunto de trabajos programables** contiene aquellos trabajos con tiempo de liberación menor o igual que la fecha actual. Un heurístico obvio sería programar el siguiente trabajo en el conjunto programable con el menor tiempo de procesado. Éste es un algoritmo heurístico y no garantiza una solución óptima. Sin embargo, si se permiten interrupciones, sí se minimiza el tiempo de flujo al programar el trabajo más corto disponible e interrumpir el que está en proceso, si hay un trabajo con tiempo de procesado más corto que el tiempo que le falta al trabajo en proceso.

Este enfoque funciona para muchos otros objetivos, como calcular una prioridad para cada trabajo y elegir el que tenga la mejor prioridad del conjunto programable. La mayor parte de los algoritmos que se han presentado se ajustan a este marco de referencia; por ejemplo, se puede usar la prioridad de R&M para la tardanza. Lo mismo que para todos los algoritmos heurísticos, deben usarse pruebas computacionales con problemas típicos para validar el enfoque.

Suponga que se tiene una situación dinámica. Cada vez <pe Se termina un trabajo, se programa el "mejor" trabajo en el conjunto programable. £1 conjunto programable se actualiza cuando llega un nuevo trabajo. Una desventaja de este enfoque es que un trabajo con prioridad baja sólo se programará cuando no haya otros trabajas que realizar, por lo que podría nunca hacerse.

Ejemplo 8-11. Programa dinámico de reparaciones para una flotilla. La ciudad de Southwestern tiene una flotilla de cerca de 2000 vehículos que van de motocicletas a palas mecánicas. Cuando los vehículos necesitan reparación, se llevan al taller en donde el despachador programa su trabajo de reparación. El programa afecta el tiempo que los vehículos no están disponibles, lo que influye en el servicio de la ciudad. Desarrolle un sistema de programación para ayudar el despachador.

Solución. Es más importante que estén disponibles algunos vehículos que otros, como el camión de bomberos o el auto del gobernador. Más aún, la importancia de algunos vehículos puede depender de cuántos vehículos similares estén en el taller. Si uno de 75 automóviles de policía no está disponible, el impacto será menor que si 10 de los 75 no están ahí, ya qu es probable que esto afecte a la seguridad. Así, no todos los trabajos tienen la misma importancia y ésta puede cambiar la mezcla de trabajos. Como se quiere regresar un vehículo tan pronto como sea posible, el tiempo de flujo ponderado parece una medida de desempeño lógica.

En este caso, el problema está en determinar buenos pesos. El personal de la ciudad dio un orden relativo para los vehículos, por ejemplo la importancia de un automóvil de policía es el doble que la del camión de la basura. Algunos pesos de los trabajos se modifican por el número de vehículos similares en el taller. Una función exponencial parecida a la usada en el modelo de R&M es ideal. Entonces, cuando un alto porcentaje de los camiones de basura está fuera de servicio, su prioridad aumenta. Para evitar que los vehículos de baja prioridad queden sin reparar, el peso de un trabajo se incrementa como una función del tiempo que espera ser reparado. Así, una barredora de calles puede tener una prioridad baja al llegar; pero entre más espera la prioridad es más alta.

En este momento existe cierto número de mecánicos y bahías de reparación en paralelo. Para simplificar el análisis, se manejará el taller como un soto procesador. Una vez determinados lo pesos, se ordenan los trabajos según el TPPC. Una máquina disponible toma el primer trabajo en la lista. Cuando llega un nuevo trabajo, se vuelven a calcular los pesos y las prioridades y se hace una nueva lista. En la sección 4 se verá que éste es un buen enfoque para procesadores en paralelo.

En la siguiente sección se examinan los problemas de una sola máquina con tiempos de preparación dependientes de la secuencia.

3.7 Tiempos de preparación mínimos

Ahora considere el caso con tiempos de preparación dependientes de la secuencia. Como ejemplo, piense en un fabricante de partes de plástico hechas con una máquina de moldeo por inyección. Las tapas de plástico para latas de crema para afeitar, eJteiQsol para pelo u otros productos domésticos se fabrican en esta máquina. Si se hace una parte diferente, debe cambiarse el dado. Si cambia el tipo de plástico o el color, la máquina debe limpiarse por completo y el plástico debe llevarse a la temperatura, presión y humedad correctas, lo que significa una preparación más larga. Otros procesos dependientes de la secuencia son el embotellado de refrescos y la fabricación de pinturas.

El tiempo para cambiar de un producto a otro puede ser largo y depender de la parte que se produjo antes. Se define p_{kj} como el tiempo para procesar el trabajo j si su antecesor inmediato es el trabajo i. Sea p_u = oo para que un trabajo nunca se preceda a sí mismo. El lapso de fabricación es un objetivo razonable, pues hace que los trabajos terminen lo más pronto posible. Los tiempos de procesamiento dependen de la secuencia, entonces, el lapso ya no es independiente de ella.

Este problema es equivalente al tan citado **problema del agente viajero** (PAV), que es *NP-duro.* El PAV consiste en un vendedor que comienza en alguna ciudad y debe visitar cada ciudad de un grupo, una y sólo una vez, y después regresar a la ciudad original. Se tiene un costo de ir de una ciudad a otra y se desea minimizar el costo total por visitar todas las ciudades. La solución se llama un paseo; es un ciclo y la ciudad inicial carece de importancia. Es equivalente a un programa cíclico de trabajos en donde los n trabajos se hacen en una secuencia y la secuencia se repite. Si éste no es el caso, se puede usar un trabajo ficticio como trabajo inicial y final, con costos de cero.

Durante un siglo, cientos de personas han intentado desarrollar buenos algoritmos heurísticos para el PAV. Existen algunos complicados que dan soluciones a muchos problemas de prueba con una cercanía del 5% al óptimo. Esto es bastante bueno si se considera que los valores de los datos pueden no conocerse con 5% de exactitud. Existen los algoritmos de ramificación y acotamiento que pueden resolver la mayoría de los casos con varios cientos de trabajos en menos de una hora.

Se analizará un algoritmo heurístico simple para el problema y después uno un poco más complicado. Se generan cotas inferiores para el lapso como parte del segundo. Esto lleva directamente al algoritmo de ramificación y acotamiento.

3.7.1 Heurístico para el tiempo de preparación más corto

El heurístico del tiempo más corto de preparación (TCP) es una manera miope de hacer un programa. De nuevo, una secuencia determina el programa. Se elige iro trabajo arbitrario. Después

se elige el trabajo, que todavía no esté en la secuencia, con el tiempo de preparación más corto cuando sigue al trabajo dado. Se agrega a la secuencia y se repite el proceso hasta incluir todos los trabajos. Este procedimiento se ilustra mejor con un ejemplo.

Ejemplo 8-12. Heurístico TCP. Francisco Villarreal es el gerente de control de la producción de Lugowski Company, un fabricante de productos de metal. Tienen un contrato para enviar abrazaderas de metal todos los días a cuatro clientes. Cada abrazadera requiere una preparación distinta en la laminadora, que es la máquina cuello de botella. La tabla 8-10 da el tiempo requerido para preparar la laminadora, dada la abrazadera precedente. Denote las cuatro órdenes de los clientes por A, B, C y D. La laminadora está preparada para hacer el trabajo A, pero como estas cuatro abrazaderas se fabrican diario, se quiere encontrar una secuencia cíclica. Debido a problemas de calidad, el trabajo C no puede seguir al trabajo D; esto se asegura si el tiempo de preparación para el trabajo C cuando sigue a D es infinito. Francisco quiere terminar las abrazaderas tan pronto como sea posible.

TABLA 8-10
Tiempos de preparación de la laminadora

Trabajo	A	B	C	D
A	00	3	4	5
B	3	00	4	6
C	1	6	00	2
D	5	4	00	00

Solución. Se elige arbitrariamente el trabajo A como el trabajo inicial. Se encuentra el menor tiempo de preparación para un trabajo que sigue a A, es decir, el número más pequeño en el renglón A. Es el trabajo B (en negritas en la tabla 8-10), por lo que la secuencia parcial es A-B. Se encuentra el menor tiempo de preparación de cualquier trabajo en el renglón B que no esté en la secuencia; es C. Aunque el elemento en la columna A es menor, como B sigue a A, A no puede seguir a B y convertirse en un programa cíclico. Para continuar, se encuentra que D sigue a C y, por lo tanto, A debe seguir a D. Esto da la secuencia A-B-C-D-A con lapso de 3 + 4 + 2 + 5 = 14, que es aceptable porque se trabajan dos turnos de 8 horas y queda tiempo para mantenimiento preventivo, limpieza, etcétera.

Elegir el menor tiempo de preparación en cada renglón no necesariamente produce un programa cíclico. Hacerlo en el ejemplo daría A-B, B-A, C-A y D-B, que no es una secuencia posible. El TCP evita esto creando un ciclo; pero este ciclo depende de qué trabajo se eligió para iniciarlo. Si se selecciona otro trabajo inicial se puede obtener una secuencia distinta; tal vez mejor, tal vez peor. Como el SST es sencillo, sería prudente usar cada trabajo como el inicial y adoptar el mejor programa generado. Otra razón para elegir más de un trabajo inicial es que la secuencia generada por el TCP puede ser arbitrariamente mala. Si se comienza con el trabajo C, se genera la secuencia C-A-B-D-C, que tiene al trabajo C después del D, aunque el tiempo de preparación es infinito.

3.7.2 Algoritmo basado en el arrepentimiento

El algoritmo TSP fue propuesto por Little *et ai* (1963). Es un algoritmo de ramificación y acotamiento que usa el concepto de **arrepentimiento** para tomar decisiones y calcular cotas. En este contexto, arrepentirse es una sanción para la decisión que no se tomó. El concepto de arrepentirse proporciona un buen heurístico para el TSP, y es la base para otro algoritmo de programación, por lo que se presentará aquí. También se muestra cómo se puede obtener la solución exacta mediante ramificación y acotamiento.

TABLA 8-11
Reducción de renglones para tiempos de preparación de laminadora

Trabajo	A	B	C	D	Mín
A	00	3	4	5	3
B	3	00	4	6	3
C	1	6	00	2	1
D	5	4	00	00	4
Suma					11

Cualquier secuencia debe contener todos los *n* trabajos y, como es un ciclo, debe contener al menos *n* elementos de la matriz. Por lo tanto, el lapso debe ser al menos tan grande como el elemento *n* más pequeño. Sin embargo, para que sea factible, cada trabajo debe estar incluido una vez; entonces se sabe que debe haber al menos un elemento de cada renglón. Esto lleva a una cota inferior más fuerte; se toma el elemento más pequeño de cada renglón y su suma es una cota inferior para el lapso. Se puede, sin pérdida de generalidad, restar el menor elemento de cada renglón de todos los elementos restantes de ese renglón, y la matriz resultante tiene la misma secuencia óptima que la original. Esto se llama **reducción de renglones** de la matriz. El elemento más pequeño del renglón se llama **coeficiente de reducción del renglón** para ese renglón. La matriz reducida tiene al menos un elemento cero en cada renglón. El lapso para el nuevo problema difiere del lapso para el problema original en la suma de los coeficientes de reducción de los renglones.

Considere los tiempos de preparación para la laminadora del ejemplo 8-12. La tabla 8-11 muestra la reducción de renglones de la matriz. El elemento mínimo en cada renglón está en negritas y se da en la columna de la derecha. La suma de las reducciones es 11, lo que implica que el tiempo total de preparación debe ser al menos 11. Un problema equivalente se forma restando el mínimo de cada renglón (tabla 8-12) y sumando 11 a su solución.

Todavía más, debe haber un elemento de cada columna en la solución, de manera que se puede hacer una **reducción de columnas** en la matriz reducida por renglones, para fortalecer la cota. En la tabla 8-12 se determina el mínimo de cada columna y se muestra en el último renglón. La suma de los coeficientes de reducción de columnas es 2, lo que da una cota inferior de 11+2 = 13 para el problema original. De nuevo, se puede restar el mínimo en cada columna de las celdas en esa columna para obtener un problema equivalente^

La reducción de columnas seguida de una reducción de renglones puede dar una cota diferente. Entre más grandes sean las dos cotas más fuerte es la cota. La tabla 8-13 da los resultados de la reducción de columnas seguida de una reducción de renglones para los datos de la laminadora. Como esta cota es 10 + 1 - 11, la primera cota obtenida es más fuerte, entonces se usaría la matriz de la tabla 8-12, reducida todavía más por la reducción por columna como problema a resolver.

TABLA 8-12
Reducción de columnas para la matriz reducida por renglones

Trabajo	A	B	C	D	Suma
A	00	0	1	2	
B	0	00	1	3	
C	0	5	00	1	
D	1	0	00	00	
Mín	0	0	1	1	2

TABLA 8-13
a) Reducción por columna y *b*) reducción por renglón de la matriz

Trabajo	A	B	C	D	Suma
A	∞	3	4	5	
B	3	∞	4	6	
C	1	6	∞	2	
D	5	4	∞	∞	
Mín	1	3	4	2	10

a)

Trabajo	A	B	C	D	Mín
A	∞	0	0	3	0
B	2	∞	0	4	0
C	0	3	∞	0	0
D	4	1	∞	∞	1
Suma					1

b)

La matriz reducida tiene un cero en cada renglón y columna. Sea (i, *j)* un elemento cero. Si se elige que *j* siga a *i* en una secuencia, se tendrá un tiempo de preparación de "cero"; el tiempo de preparación real se toma en cuenta en la cota inferior. ¿Qué pasa si no se opta por que *j* siga a *i* ? Entonces se debe seleccionar otro trabajo para que siga a i y otro trabajo para que anteceda a *j.* ¿Qué trabajo debe seguir a i? No se sabe, pero debe ser un trabajo cuyo tiempo de preparación se encuentre en el renglón *i* Se sabe que el menor tiempo de preparación en ese renglón, excluyendo a y, es una cota inferior para el hecho de no elegir que *j* siga a *i.* Se puede hacer una afirmación similar sobre el menor elemento en la columna *j.* La suma de estos dos elementos es una cota inferior para no elegir que *j* siga a *i;* esto es, cuánto representa el **arrepentimiento** por no tomar esa decisión.

Considere la matriz reducida de la tabla 8-14. Si el trabajo B no sigue a A, algún otro trabajo debe hacerlo. £1 trabajo C puede seguir sin tiempo de preparación. De igual manera, algún otro trabajo debe ser antecedente de B; D puede hacerlo sin tiempo de preparación. Así, el arrepentimiento es cero si B no sigue a A. Otra celda con cero es C-D. Si D no sigue a C, el menor tiempo de preparación para que un trabajo siga a C es O para el trabajo A. Si C no antecede a D, otro trabajo debe hacerlo; el que tiene el menor tiempo de preparación es A, con tiempo de 2. Si no se elige que D siga a C, se tendrán al menos 2 unidades más en el tiempo de preparación, o habrá un arrepentimiento de 2 unidades de tiempo por no tomar esa decisión. Parece razonable tomar la decisión C-D antes de tomar la decisión A-C, porque C-D tiene un arrepentimiento mayor.

Es prudente elegir la celda cero con el mayor arrepentimiento, digamos (i*, *j*j* y asignar *j* * después de *i* * en la secuencia. La asignación se denota por *i* *-*j* *. Dada esta asignación, ningún otro trabajo puede ir inmediatamente después de i ♦ ni preceder de manera inmediata al trabajo *j* *; entonces se eliminan el renglón *i* * y la columna *j* * de la matriz. El problema ahora tiene *n* - 1 renglones *y n* - 1 columnas. Si es necesario se reducen los coeficientes del problema de *(n-\)x(n-1* como se hizo con el problema de *n* x *n*, se calcula el arrepentimiento, se hace una asignación y se eliminan el renglón y la columna. Cada vez que la matriz se reduce, el lapso

TABLA 8-14
Matriz completamente reducida

Trabajo	A	B	C	D
A	00	0	0	2
B	0	00	0	3
C	0	5	00	0
D	1	0	00	00

aumenta en la suma de los coeficientes de reducción. Después de *n* pasos, se han hecho *n* asignaciones y se obtiene una secuencia cíclica.

Ninguna c_{ij} de la nueva matriz cambia, excepto una celda. En el caso más sencillo, se hace $c_{j^*i^*} = \infty$ para prohibir la posible asignación i-j-i, que es un subciclo o subpaseo. Si el renglón j^* o la columna i^* han sido eliminados en una iteración anterior, existe alguna otra asignación que formará un subciclo. Suponga que i-j ya se asigno y que ahora se asigna j-k, y se obtiene la secuencia parcial i-j-k. Se hace $c_{ki} = \infty$ para prohibir la asignación k-i que daría el subciclo i-j-k-i. Considere que iteraciones anteriores dieron las asignaciones i_1-i_2-i_3 y j_1-j_2-j_3-j_4. Si se asigna i_3-j_1 se crea la cadena i_1-i_2-i_3-j_1-j_2-j_3-j_4, y se prohibe j_4-i_1 haciendo su costo infinito. Cada asignación requiere que se prohiba otra asignación. La matriz que resulta siempre debe tener infinito en cada renglón y columna.

Ahora se puede formalizar el procedimiento. Sea

p_{ij} = elemento ij de la matriz de tiempos de preparación, aún de la reducida
R_{ij} = arrepentimiento del elemento ij, donde $p_{ij} = 0$
$C_{máx}$ = lapso de la secuencia parcial

PasoO. Se hace $C_{máx} = 0$ y $L = 1$.

Paso 1. Se reduce la matriz:
Para $i = 1, n$
  Sea $p_{ij^*} = \text{mín}_{j=1,n}\ p_{ij}$
  Para $j = 1, n$
    $p_{ij} \leftarrow p_{ij} - p_{ij^*}$ y
    $C_{máx} \leftarrow C_{máx} + p_{ij}$
Para $j = 1, n$
  Sea $p_{i^*j} = \text{mín}_{i=1,n}\ p_{ij}$
  Para $i = 1, n$
    $p_{ij} \leftarrow p_{ij} - p_{i^*j}$ y
    $C_{máx} \leftarrow C_{máx} + p_{i^*j}$

Paso 2. Se calcula el arrepentimiento:
Para $i = 1, n$
Para $j = 1, n$
  $R_{ij} = 0$
  Si $p_{ij} = 0$
    $p_{ij^*} = \text{mín}_{k=1,n,k\neq j^*}\ p_{ik}$
    $p_{i^*j} = \text{mín}_{k=1,n,k\neq i^*}\ p_{kj}$
    $R_{ij} = p_{ij^*} + p_{i^*j}$

Paso 3. Se elige el arrepentimiento más grande:

$$R_{i^*j^*} = \max_{i=1,n;\ j=1,n} R_{ij}$$

Paso 4. Se asigna un par de trabajos:
Se asigna i^*-j^* y $L = L + 1$.
Si $L \ngtr n$, el proceso se detiene; la secuencia está completa.
Un subciclo se prohibe estableciendo alguna $p_{kl} = \infty$.
Se eliminan de la matriz el renglón i^* y la columna j^*.
Se va al paso 1.

Ejemplo 8-13. Heurístico de arrepentimiento. Janice Burton es la ingeniera industrial en una fábrica de automóviles. Ha estado trabajando para reducir los tiempos de preparación de un grupo de productos hechos en una prensa grande. En este punto, ella piensa que hay muy pocas posibilidades de reducirlos más. Sabe que las preparaciones dependen en gran parte de la secuencia de productos. Los tiempos de preparación se dan en la tabla 8-15. Como cada uno de los productos se hace en secuencia, ella quiere encontrar la secuencia cíclica que minimice el tiempo de preparación.

TABLA 8-15
Tiempos de preparación de la prensa

Trabajo	1	2	3	4	5
1	∞	18	3	3	6
2	19	∞	9	10	5
3	9	18	∞	13	20
4	6	6	1	∞	2
5	17	1	13	17	∞

Solución. Janice sabe que este problema se ajusta al modelo del PAV. Usará el algoritmo heurístico del arrepentimiento para resolver el modelo.

PasoO. SehaceC$_{nriD[}$= Oy L = 1.

Pasol. Se reduce la matriz. El valor mínimo en el renglón 1 es 3; ocurre en dos columnas, la 3 y la 4. Entonces, el lapso debe ser al menos 3, por lo que se hace C^ = 3 y se resta 3 de todos los elementos del renglón 1. El valor mínimo del renglón 2 es 5 en la columna 5, y se anotan en la última columna. Se hace C^ = 3 + 5 = 8yse resta 5 de los elementos del renglón 2. La tabla 8-16 muestra la matriz reducida por renglones; las celdas que contienen los mínimos están en negritas. La reducción total por renglones es 19, que es una cota inferior sobre el lapso. Hay un cero en cada columna, así que no hay necesidad de reducir por columnas.

TABLA 8-16
Matriz reducida por renglones para la prensa

Trabajo	1	2	3	4	5	Mín
1	∞	15	**0**	**0**	6	3
2	14	∞	4	5	**0**	5
3	**0**	9	∞	4	11	9
4	5	5	**0**	∞	1	1
5	16	**0**	12	16	∞	1
Suma						19

Paso 2. Se calcula el arrepentimiento. La celda (1, 3) tiene valor cero; se calcula su arrepentimiento. El elemento más pequeño en el renglón 1, excluyendo (1,3) es p_{l4} = 0. El elemento más pequeño en la columna 3 (de nuevo excluyendo (1,3)) es p_{43} = O, El arrepentimiento es $R_{l3} = f\4 + p_{43}$ = 0. De manera similar, el arrepentimiento i?$_{14}$=$p_{l3} + p_{34}$ = 4. La tabla 8-17 contiene el arrepentimiento para todos los elementos cero, como superíndice.

TABLA 8-17
Cálculo de arrepentimiento

Trabajo	1	2	3	4	5
1	∞	15	0^0	0^4	3
2	14	∞	4	5	0^5
3	0^9	9	∞	4	11
4	5	5	0^1	∞	1
5	16	0^{17}	12	16	∞

TABLA 8-18
Nueva matriz de la prensa

Trabajo	1	3	4	5
1	∞	0	0	3
2	14	4	5	∞
3	0	∞	4	11
4	5	0	∞	1

TABLA 8-19
Reducción de coeficientes

Trabajo	1	3	4	5	Mín
1	∞	0	0	3	0
2	14	**4**	5	∞	4
3	0	∞	4	11	0
4	5	0	∞	**1**	0
Mín	0	0	0	1	5

TABLA 8-20
Arrepentimiento para la segunda iteración

Trabajo	1	3	4	5
1	∞	0^0	0^1	2
2	10	0^1	1	∞
3	$\mathbf{0^9}$	∞	4	10
4	5	0^0	∞	0^2

Paso 3. Se elige el mayor arrepentimiento. El elemento en la celda con el arrepentimiento máximo (5, 2) está en negritas en la tabla 8-17.

Paso 4. Se asigna un par de trabajos. El trabajo 2 sigue al trabajo 5 (es decir, 5-2). Como el arrepentimiento para la celda (5,2) es 17, cualquier solución sin 5 seguido de 2 debe tener un lapso mayor o igual que 19+17=36. SehaceZ=l + 1=2. *L* * 5= /t, y no se detiene. La celda (5,2) tiene el arrepentimiento máximo, entonces se prohibe 2-5 haciendo *p*^ = oo, y se eliminan el renglón 5 y la columna 2. Se regresa al paso 1 con la nueva matriz que se da en la tabla 8-18.

Pasol. Se reduce la matriz. El renglón 2 es el único sin cero en la tabla 8-18. El menor elemento en este renglón es p_{23} = 4, así que se resta 4 de todos los elementos en el renglón. Después de la reducción por renglón, la columna 5 no tiene un cero; el elemento mínimo en esa columna es p_{45} = 1. La tabla 8-19 muestra en negritas las celdas con mínimos distintos de cero. Se resta 1 de los elementos de la columna 5. Se hace C^ = 19 + 4 + 1 = 24, entonces cualquier programa con 5-2 debe tener un lapso de al menos 24.

Paso 2. Se calcula el arrepentimiento. El arrepentimiento se calcula como antes y está dado en la tabla 8-20.

Paso 3. Se elige el arrepentimiento mayor. La celda (3,1) tiene el arrepentimiento más grande.

Paso 4. Se asigna un par de trabajos. Se elige que el trabajo 1 siga al trabajo 3. Se eliminan el renglón 3 y la columna 1; se prohibe 1-3 haciendo su costo infinito. La cota inferior sobre la mejor solución con 5-2 y 3-1 todavía es 24. La cota inferior sobre la mejor solución con 5 seguido de 2 y 3 no seguido de 1 es 24 + 9 = 33.

Paso 1. Se reduce la matriz. Hay un cero en cada renglón y columna, por lo que no se necesita reducir los coeficientes. La matriz que resulta se muestra en la tabla 8-21.

TABLA 8-21
Matriz reducida: tercera iteración

Trabajo	3	4	5
1	∞	$\mathbf{0^3}$	2
2	0^1	1	∞
4	0^0	∞	0^2

TABLA 8-22
Matriz final

Trabajo	3	5
2	0	∞
4	∞	0

Paso 2. Se calcula el arrepentimiento. El arrepentimiento máximo de 3 se encuentra en la celda (1,4) de la tabla 8-21. Se programa el trabajo 4 inmediatamente después del trabajo 1. La secuencia parcial es ahora 5-2, 3-1-4. Se eliminan el renglón 1 y la columna 4. Se prohíbe 4-3 para que no se asigne 3-1-4-3. La cota sobre el programa parcial es 24. La cota para 5-2,3-1, pero sin 4 después de 1, es 24 + 3 = 27.

La matriz final se muestra en la tabla 8-22. En este punto, deben elegirse 2-3 y 4-5, lo que da la secuencia 3-1-4-5-2. El tiempo total de preparación de esta secuencia es 24.

3.7.3 Un algoritmo de ramificación y acotamiento

El heurístico del arrepentimiento se puede usar en el enfoque de ramificación y acotamiento. Cada asignación es un nivel en el árbol de ramas y cotas. Si se asigna el trabajo *j* después del trabajo i, *i-j,* éste es un nodo del árbol. El nodo alternativo es prohibir la asignación *i-j,* lo cual se denota por *i-j*. La cota en el nodo *i-j* es la suma de las reducciones, y la cota sobre *i-j* es la suma de las reducciones más el arrepentimiento por no hacer la asignación *i-j*. El árbol de ramas y cotas para el ejemplo 8-13 se presenta en la figura 8-6.

Para este problema no se necesita la ramificación, porque el heurístico del arrepentimiento produce una solución con valor 24, y todos los nodos alternativos tienen cotas más altas. Deben verificarse todos los nodos para asegurar la optimalidad. Si hubiera sido necesaria la ramificación, digamos para el nodo que prohíbe la asignación *i-j,* se hubiera usado la matriz a partir del nodo padre, ajustada estableciendo p_u ■$= \infty$, para el resto de la rama.

3.8 Métodos de búsqueda de una sola máquina

Los procedimientos de búsqueda se usan para una gran variedad de problemas de optimiza-ción, incluyendo la optimización no lineal y la combinatoria. En la programación de la producción, los procedimientos de búsqueda se han usado ampliamente. Éstos incluyen los enfoques de búsqueda en la vecindad, simulación de recocido, búsqueda tabú, algoritmos genéticos y redes neuronales. Se puede consultar un análisis más detallado sobre los procedimientos de búsqueda para programación en Morton y Pentico (1993). Como ilustración, se describe una búsqueda en la vecindad.

3.8.1 Búsqueda en la vecindad

En el método de búsqueda en la vecindad, se selecciona un programa inicial llamado semilla. Después se generan y evalúan programas "cercanos" a la semilla, llamados vecinos, y se selecciona un vecino mejor como la nueva semilla. Esto se repite hasta que ningún vecino sea mejor, punto en el que termina el procedimiento. El programa final es al menos un óptimo local. Algunos aspectos específicos del problema de la búsqueda en la vecindad incluyen qué medida de desempeño usar, cómo determinar una semilla inicial, qué constituye una vecindad y cuál vecino, si lo hay, elegir como el nuevo programa.

Cualquiera de las medidas de desempeño definidas se puede usar en la búsqueda en la vecindad. Una ventaja de este procedimiento es que se puede usar una combinación ponderada de medidas; ésta puede reflejar el costo o la ganancia de un programa de manera más exacta. Para

facilitar la presentación se hará referencia al costo de un programa y se supondrá que es una medida común, por lo que una secuencia define un programa.

Se puede usar cualquier heurístico para obtener una secuencia inicial. Es evidente que una semilla inicial buena tiene más posibilidades de producir una mejor solución final. Por lo tanto, casi siempre vale la pena usar un algoritmo heurístico que dé una buena secuencia paraxomenzar.

La vecindad más sencilla se define por el **intercambio adyacente por pares** (IAP). Simplemente se intercambian dos trabajos adyacentes, digamos *i* y *j*, en la secuencia. Por ejemplo, al intercambiar los trabajos 5 y 6 en la secuencia inicial

1.2-3-4-5-6-7-8-9

se obtiene la secuencia

1-2-3-4-6-5-7-8-9

El IAP da como resultado n - 1 vecinos de la secuencia inicial. El **intercambio por pares** (IP) define una vecindad diferente. El IP no requiere intercambiar trabajos adyacentes. Por ejemplo,

1-2-8-4-5-6-7-3-9

se obtiene de la secuencia inicial con el intercambio de los trabajos 3 y 8. Al usar el IP, una secuencia tiene $n\{n$ - l)/2 vecinos. El IAP es un caso especial de IP; su vecindad es un subconjunto de la vecindad IP. Una tercera vecindad se forma mediante la **inserción** (INS). Se insertan algunos trabajos entre otros dos trabajos. La secuencia

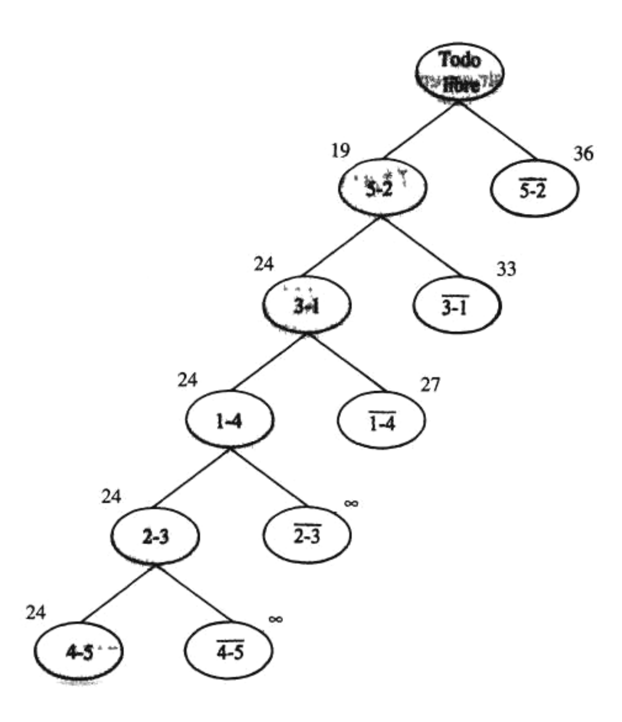


FIGURA 8-6
Árbol de ramas y cotas

1-2-3-7-4-5-6-8-9

se puede obtener de la secuencia inicial si se elige insertar el trabajo 7 entre los trabajos 3 y 4. Cada secuencia tiene $(n - I)^2$ vecinos por INS.

Por último, se debe elegir un vecino como a nueva semilla. Una estrategia es evaluar el costo de todos los vecinos y seleccionar el que tenga el menor costo como la nueva semilla. Si la vecindad es pequeña y es fácil evaluar el costo de una secuencia, examinar todos los vecinos es una tarea razonable. Si la vecindad es grande o es relativamente difícil evaluar una secuencia, una buena estrategia podría ser tomar como la nueva semilla al primer vecino que se encuentre con un costo más bajo. Se podría hacer una elección media; por ejemplo, se evalúan los vecinos hasta que se encuentre uno 10% mejor. Si no hay un vecino 10% mejor, se selecciona el mejor vecino como la nueva semilla. Si no hay un vecino que sea mejor, el procedimiento se detiene. Se ilustra una búsqueda en la vecindad sencilla con el ejemplo 8-14.

Ejemplo 8-14. Búsqueda en la vecindad. Considere el problema de la tardanza de una sola máquina con los datos presentados en la tabla 8.23. Utilice la secuencia FEC como la semilla inicial con una vecindad IAP, tomando como nueva semilla la primera secuencia que mejora.

TABLA 8-23
Datos para la búsqueda en una vecindad

Trabajo	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Tiempo de procesamiento	10	3 16	16	8 30	4 35	10 37
Fecha de entrega	15		24			

Solución

Paso 1. Se construye una secuencia FEC y se evalúa su tardanza total. Se denota la secuencia por *S* * y su tardanza por T*. Se establecen *i* = 1 y y = 2

Paso 2. Se intercambian los trabajos en la posición *i yj* de la secuencia *S* *; la secuencia es 5" con tardanza total *T* Si *T' < T**, se va al paso 4.

TABLA 8-24
Solución de búsqueda en una vecindad

Trabajos		**Programa**						**Tardanza**
i	***j***	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**32***
1	2	**2**	**1**	3	4	5	6	32
2	3	1	**3**	**2**	4	5	6	42
3	4	1	2	**4**	**3**	5	6	33
4	5	1	2	3	**5**	**4**	6	30♦
1	2	**2**	**1**	3	5	4	6	30
2	3	1	**3**	**2**	5	4	6	40
3	5	1	2	**5**	**3**	4	6	34
5	4	1	2	3	**4**	**5**	6	32
4	6	1	2	3	5	**6**	**4**	32

* Semilla inicial
♦ Nueva semilla

Paso 3. Se hace $j = j + 1$. Si $j > n$, se va al paso 5. De otra manera, se hace $i = i + 1$ y se va al paso 2.

Paso 4. Se sustituye S' en lugar de S^* y T' en lugar de T^*. Se hace $i = 1$ y $j = 2$. Se va al paso 2.

Paso 5. Se detiene; S^* es una secuencia óptima local.

La secuencia FEC es 1 -2-3-4-5-6 con vector de tardanza (0,0,5,7,6,14) y tardanza total de 32. Los resultados de la búsqueda en una vecindad están dados en la tabla 8-24. El primer intercambio 2-1 (en negritas en la tabla) no cambia la tardanza. El segundo, 3-2, de hecho la aumenta. El cuarto vecino que se examinó (de los cinco posibles) disminuye la tardanza a 30, por lo que se convierte en la nueva semilla y el procedimiento se repite. En la tabla 8-24 se observa que no hay un vecino de IAP con tardanza menor que 30.

La mejor secuencia para el ejemplo 8-14 es 1-2-4-5-6-3 con tardanza de 27. El algoritmo de búsqueda en una vecindad que se usó no encuentra la mejor secuencia comenzando con la secuencia FEC. Una semilla inicial diferente pudo haber producido la mejor secuencia. Recuerde que el heurístico de R&M obtuvo una secuencia con tardanza de 27, de manera que habría sido una semilla inicial excelente. Una vecindad distinta puede mejorar la calidad de la secuencia generada. Para este problema, tanto IP como INS hubieran producido una secuencia con tardanza de 27. Evaluar todas las vecindades y elegir el mejor vecino también puede dar mejores resultados. Aceptar otro vecino con la misma tardanza ($T' < T^*$ en el paso 2) también puede mejorar las soluciones. Realizar la búsqueda en una vecindad con diferentes semillas iniciales y elegir el mejor resultado también puede mejorar las soluciones. Todos estos cambios requieren más cálculos que no garantizan una mejor solución. El esfuerzo computacional no es importante para un problema con seis trabajos, pero puede serlo para problemas grandes.

Cuando es posible, el esfuerzo computacional se reduce si se actualiza el valor de un vecino a partir del valor de la semilla, en lugar de calcularlo completo. Asimismo, en el paso 4, se establecen $i = 1$ y $j = 2$,que no siempre es necesario. La estructura de un problema específico también reduce el esfuerzo; por ejemplo, los problemas de tardanza pueden prohibir un intercambio que viole las condiciones de Emmons.

Si la búsqueda en una vecindad no proporciona soluciones suficientemente cercanas al óptimo, puede ser necesario aplicar otros métodos. Se estudiará una variación llamada simulación de recocido.

3.8.2 Simulación de recocido

La mayor desventaja de la búsqueda en una vecindad es que, una vez que se encuentra un mínimo local, el procedimiento se detiene. Al permitir algunos movimientos a vecinos con soluciones peores, la simulación de recocido explora una parte mayor del espacio de soluciones, y encuentra (se espera) una mejor solución que la búsqueda en una vecindad.

La simulación de recocido se origina en las ciencias físicas; el recocido es el proceso de enfriamiento controlado de un líquido hasta que se solidifica. Al reducir la temperatura lentamente, se resaltan las propiedades de la sustancia. En un principio, el material está a una temperatura alta y es fácil cambiar sus estados. Conforme se enfría, el material se solidifica y el cambio de estados es más difícil. Por último el material se congela y no es posible hacer más cambios. Esto nos proporciona la terminología de simulación de recocido. La aceptación de un

vecino como nueva semilla es una función de la temperatura. Se comienza a una temperatura alta, lo que permite que se acepten como semilla muchos vecinos que no mejoran la solución. Un programa que se está enfriando disminuye la temperatura, lo que reduce el número de movimientos que no mejoran. Por último, la temperatura se reduce lo suficiente para congelar el procedimiento, de manera que sólo se acepten soluciones que mejoran.

Igual que en la búsqueda en una vecindad, existen muchas maneras de implantar la simulación de recocido; deben elegirse muchos valores de parámetros. Se presenta un enfoque directo que sigue las ideas de Johnson *et al.* (1989). Sea

c* = costo de la mejor secuencia encontrada hasta ahora (la incumbente)
c = costo de la secuencia semilla
c = costo de la vecindad que se examina
T = temperatura inicial $(T > 0)$
R = factor de enfriamiento $(R > 0)$
A = *c* - *c* = diferencia en costo entre un vecino y la semilla

Igual que en la búsqueda en una vecindad, si A < 0, el vecino es una mejora y se puede convertir en una nueva semilla. Sin embargo, si A > 0, de todas maneras el vecino puede sustituir a la semilla. Existe una probabilidad de que se acepte una solución más pobre. Esta probabilidad depende de qué tanto peor es el vecino comparado con la semilla. Si A es negativa, conviene moverse, pero entre más grande sea A, menos atractivo será cambiar la semilla. La probabilidad también debe depender de cuántas iteraciones lleva la búsqueda, según lo determina la temperatura. Al principio de la búsqueda se debe estar más dispuesto a hacer movimientos "malos", mientras que más adelante deben evitarse. La duración de la búsqueda está determinada por la temperatura, la cual al principio tiene un valor positivo y disminuye al avanzar la búsqueda, hasta que finalmente la congela.

Considere la función e~A /T; si A < 0 y T > 0, entonces *e~A h* > 1. Si A es positivo y T > 0, *e- A h e* (o? *iy* Mientras más grande sea A y más pequeño sea T, más cerca de cero estará e~~A /T. Sea *q* un número aleatorio generado a partir de una distribución uniforme (0,1). Si *q* < e~A /T, el vecino sustituye a la semilla. Esto siempre acepta los movimientos para mejorar, y acepta los movimientos que empeoran si no son "demasiado" malos o si la temperatura es alta.

Los algoritmos de simulación de recocido también requieren un programa de enfriamiento para controlar la temperatura. Se presenta uno muy sencillo, el programa de enfriamiento geométrico (Collins, Eglese y Golden, 1988). Después de una pasada completa por el conjunto de trabajos, la temperatura se sustituye por la temperatura que se tiene multiplicada por una constante. Esta constante, llamada tasa de enfriamiento, se denota por *R* y es menor que 1. Cada pasada completa por el conjunto de trabajos da como resultado una disminución de la temperatura. Se han propuesto métodos más complicados, como un programa logarítmico. Se dice que el proceso está "congelado" cuando el procedimiento ha realizado *K* "pasadas" consecutivas por el conjunto de trabajos sin mejorar el costo.

Como el costo de la semilla puede aumentar, el algoritmo guarda el costo menor que se haya descubierto en alguna iteración. Esto se llama **secuencia incumbente,** y asegura que la solución con el menor costo esté disponible, aun cuando el proceso termine con una semilla de costo más alto.

Se puede establecer un algoritmo para la simulación de recocido para el problema de la tardanza en una sola máquina. Como antes, se usa IAP para generar vecinos, FEC como la semilla

inicial y se elige el primer vecino que acepte el criterio de la simulación de recocido que se analizó.

Paso 1. Sea T = 1 la temperatura inicial, R = 0.95 la tasa de enfriamiento y K = 5 el límite de iteraciones. La secuencia semilla es la secuencia FEC. Esta secuencia se denota por s y se calcula c, el costo de s, donde c es la tardanza total de s. Se establecen la secuencia incumbente y el costo igual a la secuencia actual y su costo: s* = s y *c** = c. Se hace *i* = 1, *j*" = 2 y *k* = 1.

Paso 2. Se intercambian los trabajos en las posiciones *i* y *j* de la secuencia s para formar la secuencia vecina *s.* Sea *c* la tardanza de s'. Sea A = *c* - c, y se elige *q* al azar en (0,1). Si *q* < $e\sim^{A/T}$, se va al paso 4.

Paso 3. Se establece 7 = 7 + 1. Si 7 > n_9 se va al paso 5. De otra manera se hace *i* = *i* + 1 y se va al paso 2.

Paso 4. Se sustituye s' en lugar de s y c = c\ Si c < c*, se hace c* = c, se remplaza s* con s y se hace *k* = 1. Se establece /= 1,7 = 2 y se va al paso 2.

Paso 5. Se reduce la temperatura sustituyendo R X T en lugar de T. Se hace *k* = *k* + 1. Si *k* > *K*, el proceso se detiene; el proceso se congela y s* es la secuencia de menor costo encontrada. De otra manera se va al paso 2.

La mayor parte de los comentarios hechos sobre vecindades y la selección de la siguiente semilla para la vecindad son válidos para la simulación de recocido. Ésta parece depender mucho menos de la semilla inicial. Para lograr que un algoritmo de simulación de recocido tenga un buen desempeño, deben llevarse a cabo experimentos con los valores de la temperatura, las tasas de enfriamiento y los programas, y con el número de iteraciones sin mejora para congelar el proceso. La simulación de recocido puede ser una herramienta poderosa general para los problemas de programación.

Al aplicar la simulación de recocido al ejemplo 8-14 con IAP, una semilla aleatoria y un límite de 100 iteraciones, se obtiene la misma secuencia (1-2-3-5-4-6, *T* = 30) que se obtuvo con la búsqueda en una vecindad. Si se aumenta el límite de iteraciones a 500, o se comienza con la semilla FEC, se obtiene la secuencia 1-2-4-6-5-3 con *T* = 27, que también se obtuvo con el algoritmo heurístico R&M. Mediante ramificación y acotamiento se verifica que ésta es la secuencia óptima.

3.9 Resultados para una sola máquina

Esta sección contiene una variedad de resultados básicos para problemas de una sola máquina. Para resumirlos, se construyó la tabla 8-25. Para cada medida estudiada se da un algoritmo adecuado y se observa si es un algoritmo heurístico o exacto. Recuerde que los algoritmos de ramificación y acotamiento son exactos, pero el tiempo de solución para un problema es una función exponencial del tamaño del problema. No se incluyen los procedimientos de búsqueda, porque se pueden usar como un heurístico para cualquiera de los problemas de una sola máquina.

TABLA 8-25
Resumen de resultados para una sola máquina

Modelo	Algoritmo*
Tiempo de flujo	TPC (E)
Retraso	TPC (E)
Tiempo de flujo ponderado	TPPC (E)
Tardanza máxima (retraso)	FEC (E)
Número de trabajos tardíos	Hodgson (E)
Número ponderado de trabajos tardíos	Hodgson modificado (H)
Ningún trabajo tardío/tiempo de flujo	TPC modificado (E)
Tardanza ($d_j = D$)	TPC (E)
Tardanza ($p_j = P$)	FEC (E)
Tardanza	R&M (H)
Tardanza ponderada	R&M (E)
Adelanto no restringido + tardanza	Forma de V (E)
Adelanto restringido + tardanza	S&A (H)
Despacho dinámico (tiempo de flujo)	TPPC dinámico (H)
Secuencia dependiente	Arrepentimiento (H)
Secuencia dependiente	B&B (E)

* E = algoritmo exacto; H = algoritmo heurístico

SECCIÓN 3 EJERCICIOS

8.4. Programe los siguientes trabajos en una máquina para minimizar el tiempo de flujo. Proporcione el valor del tiempo de flujo óptimo.

Trabajo j	1	2	3	4	5
p_j	3	6	1	2	4

8.5. Un pequeño taller de reparaciones tiene seis automóviles para reparar. Los dueños de los vehícu los se encuentran en un área de espera y se irán cuando terminen su reparación. Sólo Gerry está disponible para hacer los trabajos. Estima que los tiempos que necesita para las reparaciones son 115,145,40,25,70 y 30 minutos para los automóviles 1 al 6, respectivamente. ¿Qué programa re comendaría?

8.6. Encuentre el programa que minimiza el tiempo de flujo ponderado para el siguiente problema de una sola máquina:

Trabajo i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p_i	23	25	5	15	23	6	14	6	7	12
w_i	3	1	1	3	2	1	1	1	3	3

8.7. Una compañía tiene una célula que puede producir tres partes: A, B y C. El tiempo requerido para producir cada parte es 25,80 y 10 minutos, respectivamente. Los valores respectivos de las partes son $5, $20 y $1. ¿Cómo programaría las partes a través de la célula para minimizar el valor del trabajo en proceso?

8.8. Un contratista tiene órdenes para construir cinco casas. Él tiene una reputación excelente, por lo que los clientes esperarán lo que sea necesario. Los rendimientos para el contratista (en múltiplos de $ 1000) y los tiempos (en días) para construir cada casa son

Casa	1	2	3	4	5
Costo	145 15	290	910	1150	2000
Tiempo		20	40	45	100

Suponiendo que sólo pueden construir una casa a la vez, ¿cuál sería la medida apropiada para programar la construcción de las casas? Use esta medida para determinar el programa que debe seguir el contratista. 8.9. Encuentre el programa que minimiza la tardanza máxima para los siguientes datos.

Trabajo i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p_i	17	22	12	6	11	17	9	15	10	9
w_i	67	75	37	59	67	88	61	48	79	57

8.10. Demuestre o dé un contraejemplo para la siguiente afirmación: el TPC minimiza la tardanza máxima.

8.11. Sea $Sj = dj - p_j$ el tiempo de holgura para cada trabajo. Demuestre que el tiempo de holgura máximo (THM), es decir, $S_{[1]} \pounds S_{[2]} \pounds - - ' \pounds S_{[n]}$*,maximiza* $L\wedge =$ mín$_{\gamma \cdot = un}${/,,.}.

8.12. Utilice los datos del problema 8.9 para encontrar el programa que minimiza el tiempo de flujo sin trabajos tardíos.

8.13. Desarrolle un algoritmo para minimizar el tiempo de flujo al mismo tiempo que se mantiene T_{mi0l} con un valor específico. ¿Es éste un algoritmo exacto? ¿Es polinomial?

8.14. Una pequeña compañía procesadora de alimentos deben realizar siete trabajos (vea la tabla; los datos se expresan en términos de días). El gerente desea entregar las órdenes tan pronto como sea posible, para reducir el espacio que se usa para los trabajos en proceso, y quiere que todos los trabajos se entreguen con no más de tres días de retraso. ¿Qué programa recomendaría?

Trabajo j	1	2	3	4	5	6	7
p_j	4	2	8	9	3	6	1
d_j	6	13	14	22	31	33	38

8.15. Proporcione un algoritmo para minimizar el tiempo de flujo total en una sola máquina cuando existe precedencia entre los trabajos. ¿Es éste un algoritmo polinomial? ¿Produce programas óptimos? {*Sugerencia:* piense en la minimización del tiempo de flujo con todos los trabajos a tiempo.)

8.16. Encuentre un buen programa del tiempo de flujo para los siguientes trabajos con tiempos de liberación de las órdenes:

Trabajo i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p_i	16	11	6	18	2	20	19	20	8	16
r_i	22	6	0	6	21	7	29	121	64	48

8.17. Devonaire es supervisor del taller de núcleos en Newman Foundries. Se planea llevar a cabo, en la línea de moldeo, cuatro trabajos que necesitan núcleos. Como existe incertidumbre sobre el trabajo actual en proceso, no puede comenzarse un trabajo en el taller hasta que se programe la línea de moldeo. Si el trabajo i necesita núcleos y se programa para comenzar en la línea de moldeo en el tiempo s_{i9} no puede comenzar en el taller de núcleos hasta $s_j - p_j - 4$, en donde 4 es un tiempo de compensación arbitrario; Si los núcleos no están listos cuando se programa un trabajo para comenzar en la línea de moldeo, la línea debe esperar hasta que los núcleos estén listos. Los datos de los cuatro trabajos se dan en la tabla, donde los tiempos están en horas y d_j es el tiempo en que debe entregarse el trabajo para comenzar en la línea de moldeo.

Trabajo *i*	1	2	3	4
p_i	5	8	2	10
d_i	16	30	38	44

a) ¿Cuál es la función objetivo apropiada para este problema?
b) ¿Qué programa recomendaría a Devonaire?
c) Suponga que en el tiempo 10 se cancela el trabajo 2 y se sustituye por los trabajos 5 y 6 con tiempos de procesado 4 y 6 y tiempos de entrega 28 y 36. ¿Qué cambios haría al programa?

8.18. Encuentre la tardanza del programa FEC y del programa heurístico R&M para los siguientes trabajos:

Trabajo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pt	7	12	2	6	11	15	9	3	9	14
*i	67	75	37	59	67	88	61	48	79	57

8.19. Dado un vector de tiempos de procesado /?= (1,5,3,4,2,2) y fechas de entrega *d* = (2,7,9,8,15, 18), encuentre la secuencia de tardanza óptima.
8.20. Demuestre o dé un contraejemplo para la siguiente afirmación: el FEC minimiza la tardanza total si todos los trabajos tienen los mismos tiempos de procesado.
8.21. Demuestre que, si *p¡* ^ *p,; y d¡* <> *d*jv entonces el trabajo *i* debe anteceder al trabajo *j* en algún programa óptimo para el problema de la tardanza en una sola máquina.
8.22. Encuentre el programa de tardanza total óptima para el siguiente problema de una sola máquina.
(Sugerencia: use la información que pueda.)

Trabajo/'	1	2	3	4	5	6
Pj	79	96	102	121	130	147
dj	255	683	580	260	337	269

8.23. Encuentre el número mínimo de trabajos tardíos en una sola máquina para los siguientes datos:

Trabajo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pt	15	11	10	5	25	4	8	3	20	11
dt	71	76	73	88	47	59	24	55	23	47

8.24. Un taller de reparación de automóviles ofrece un reembolso de $50 a cada cliente cuyo trabajo no esté listo para la fecha prometida. En este momento, el taller tiene cinco automóviles para reparar, con los siguientes tiempos de procesado y fechas de entrega (en días a partir de hoy):

Trabajo *i*	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
p_i	2	3	4	1	2
d_i	5	5	8	10	10

a) Suponga que sólo se puede reparar un automóvil a la vez e indique al gerente en qué orden debe programar el trabajo.
b) Suponga que el taller hace el trabajo gratis en lugar de dar el reembolso de $50. Comente sobre el problema de programación que se obtiene.

8.25. Una estudiante tiene cuatro proyectos para entregar en las próximas dos semanas. Ella puede obtener C de calificación en cada uno sin hacer un esfuerzo adicional, obtener B requerirá más tiem-

¿De qué manera debe disponer de su tiempo para obtener las mejores calificaciones?

po y lograr una A en cualquiera de los proyectos parece imposible. Los tiempos (en días de trabajo) y las fechas de entrega (en días a partir de hoy) para los trabajos son

Proyecto	1	2	3	4
Tiempo	2	4	3	2
Entrega	5	8	8	10

8.26. En el problema 8.246), suponga que los costos (en dólares) de las reparaciones fueron 500,1000, 2300,400 y 600. ¿Qué programa recomendaría?

8.27. Proporcione un algoritmo de ramificación y acotamiento para minimizar el número ponderado de trabajos tardíos en una máquina. Sea tan específico como pueda; incluya la solución inicial, calcu le las cotas, dé la ramificación, etc. Algunas figuras pueden ayudarle a explicar sus métodos.

8.28. Desarrolle un modelo de programación matemática para resolver el problema del número ponde rado de trabajos tardíos en una sola máquina.

8.29. Describa un algoritmo para resolver el problema del número ponderado de trabajos tardíos en una sola máquina, cuando todos los trabajos tienen una fecha de entrega común *D.*

8.30. Considere el siguiente conjunto de trabajos:

Trabajo/	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pi	5	11	18	8	20	4	14	9	10	16

á) Encuentre la suma mínima de adelanto y tardanza si la fecha de entrega común es 90.
b) Repita el inciso anterior si la fecha de entrega es 65.

8.31. Newnan Foundry tiene seis trabajos que realizar para un solo cliente. Como el espacio está en ex tremo limitado, el costo por hora de un trabajo adelantado es casi el mismo que el de uno que se termina después de la fecha de entrega. Hoy es lunes y Newnan Foundry trabaja dos turnos de 10 horas al día, seis días a la semana. Los seis trabajos de este cliente se prometieron a primera hora de la mañana del viernes. Sus tiempos de procesado son 7,12,3,18,10 y 8. ¿Cuándo deben pro gramarse los trabajos? ¿Qué pasaría si se hubieran prometido para el miércoles a las 12 del día?

8.32. Considere los siguientes tiempos de procesado dependientes de la secuencia:

Trabajo	1	2	3	4	5
1	—	22	15	24	15
2	35	—	24	29	1
3	19	23	—	30	13
4	39	18	0	—	9
5	11	0	2	12	—

a) Dé una secuencia según el heurístico del tiempo de preparación más corto.
b) Dé una secuencia según el heurístico del arrepentimiento.
c) Dé la secuencia óptima.

8.33. Un troquel hace cuatro partes. Una vez terminada cada parte, se realiza un cambio para la siguien- te parte programada. El tiempo (en horas) para el cambio depende de la secuencia y se muestra en la tabla. El procesado real de las partes puede tomar hasta dos días. Suponga que las partes deben hacerse una a la vez en un programa rotativo, ¿qué secuencia recomendaría?

Parte	1	2	3	4
1	—	1	3	4
2	6	—	10	4
3	10	2	—	3
4	2	1	4	—

8.34. Prodigious Plastics, una pequeña compañía, hace partes de plástico que varías compañías usan en productos finales. Por el momento necesitan producir seis lotes de partes en una máquina de moldeo por inyección. Cuando hay un cambio de partes, la máquina tiene un tiempo de preparación de 10 minutos para colocar otro dado (herramienta). Las partes se hacen de poliestireno (PST) o de polipropileno (PPR). La preparación de la máquina de un tipo de plástico a otro toma dos horas. Estos tiempos son independientes de las partes. Los lotes tienen los siguientes tiempos de procesados y bases de plástico.

Trabajo/	1	2	3	4	5	6
Pi	50	120	40	30	130	210
Plástico	PST	PST	PPR	PST	PPR	PST

¿Qué programa recomendaría para minimizar el lapso 4e producción?

8.35. El ejercicio 8.34 es un ejemplo típico de programación por grupos. Se desea programar grupos de trabajos en una sola máquina. Un grupo, i, consiste en los trabajos (i, 1), (i, 2), ..., (i, *n(i))*> que tiene una preparación común. Hay *N* grupos de trabajos que deben procesarse. La preparación del grupo *i* requiere *s(i)* unidades de tiempo y es independiente del orden en que se producen los gru pos. Sea *p(i, j)* el tiempo requerido para procesar el trabajo *j* del grupo i. Si se procesan dos o más trabajos seguidos del mismo grupo, sólo se requiere una preparación. Sin embargo, si se procesa un trabajo del grupo *i*, seguido de un trabajo del grupo *k*, seguido de otro trabajo del grupo i, deben realizarse dos preparaciones para el grupo /.

a) Suponga que la medida de desempeño es la suma de los tiempos de terminación de todos los trabajos. Describa el enfoque que adoptaría para resolver este problema.

b) Existen *N* grupos de n_t trabajos con d_u como la fecha de entrega del trabajo *j* en el grupo *i*. To dos los trabajos en un grupo deben procesarse uno tras otro. Desarrolle un algoritmo para mi nimizar 7^ = máx^máxíO, C_u - *d*^} para este problema. Suponga que los lotes tienen las siguientes fechas de entrega: 210,240,350,600,650 y 790. ¿Qué programa recomendaría pa ra minimizar la tardanza máxima?

8.36. Considere los siguientes datos de un problema de tardanza:

Trabajo i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pi	5 57	9 57	1136	7 43	1 32	10 54	7 54	7 49	15 40	10 50

a) Aplique la búsqueda en una vecindad con intercambio adyacente por pares.

b) Compare el resultado con el que se obtiene con intercambio por pares.

8.37. Utilice el método de ramificación y acotamiento para determinar la calidad de la respuesta al ejer cicio 8.36.

8.38. Aplique la búsqueda en una vecindad al ejercicio 8.16.

8.39. Analice en forma breve la diferencia entre la búsqueda en una vecindad y la simulación de reco cido.

8.40. Utilice la simulación de recocido para obtener un programa para los datos del ejercicio 8.36.

8.41. Considere el siguiente problema de programación de una sola máquina con la tardanza como me dida:

Trabajo i	1	2	3	4	5
p_i	1	1	1	1	1
d_i	8	7	9	3	2

Comenzando con la secuencia semilla 1-2-4-5-3, haga una búsqueda en una vecindad usando intercambio *adyacente* por pares. ¿Es óptimo el programa que resulta? ¿Es sorprendente este resultado a la luz del ejercicio 8.20?

8.42. Considere la búsqueda en una vecindad usando intercambio *adyacente* por pares. Dibuje la vecindad para un caso de tres trabajos. Extienda esto a un problema de cuatro trabajos. Desarrolle un ejemplo de un problema de tardanza en una sola máquina, con un programa óptimo local que no sea un óptimo global.

4 MÁQUINAS PARALELAS

Con frecuencia, los problemas de programación consideran varias máquinas. Las máquinas múltiples pueden estar colocadas en paralelo o en serie. En esta sección se estudiarán varios modelos para sistemas paralelos.

La figura 8-7 describe máquinas paralelas. Cuando se usan máquinas múltiples en paralelo, se supone que cualquier trabajo se puede procesar en cualquiera de las máquinas, y que el tiempo para procesar un trabajo es el mismo en cualquiera de ellas, es decir, son máquinas idénticas. Además, los trabajos consisten en una sola operación; una vez que comienza el procesado de un trabajo en una de las máquinas, debe terminarse. La decisión de programación comprende dos aspectos: qué máquina procesa el trabajo y en qué orden.

Aunque es difícil obtener una solución óptima para los problemas de máquinas idénticas en paralelo, se sabe que para una medida normal la solución óptima se puede ver como una **lista programada.** Una lista es una secuencia de todos los trabajos. Para crear un programa, se asigna el siguiente trabajó en la lista a la máquina con la menor cantidad de trabajo asignado, y se continúa hasta que todos los trabajos en la lista se asignan. El algoritmo es

Paso 0. Seai/$_f$ = 0, i = 1,2, >.., m la carga de trabajo asignada a la máquina i, L = ([1], [2], ..., [/i]) la lista ordenada de la secuencia, C_j = 0* j = 1,2,..., n y k = 1.

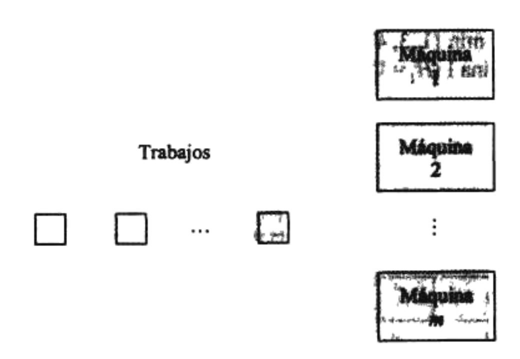


FIGURA 8-7
Máquinas paralelas

Paso 1. Se hace $j^* = \iota_k$ y $H_{i^*} = \text{mín}_{i=1,m}\{H_i\}$; los empates se rompen arbitrariamente. Se asigna el trabajo j^* para procesarse en la máquina $i^*, C_{j^*} = H_{i^*} + p_{j^*}, H_{i^*} \leftarrow H_{i^*} + p_{j^*}$.

Paso 2. Se hace *k* = /c+ 1, si fc > n,el procedimiento se detiene; el programa está completo. De otra manera, se va al paso 1.

Se examinará una implantación específica.de listas programadas; de nuevo los modelos se jerarquizan según la medida de desempeño.

4.1 Tiempo de flujo

Del análisis de los problemas de una sola máquina, se sabe que TPC minimiza el tiempo de flujo en una máquina, de manera que es probable que la lista TPC sea un buen punto de partida. Se programa el trabajo con el menor tiempo de procesado en Cualquier procesador, después el trabajo con el siguiente tiempo de procesado más pequeño, para que comience en cuanto sea posible en la máquina con el menor tiempo total de procesado. Se continúa hasta que todos los trabajos están programados; una prueba directa muestra que este procedimiento minimiza el tiempo de flujo.

Ejemplo 8-15. Tiempo de flujo mínimo en procesadores paralelos. Gerry Pratt es propietario de Pratt Plastics, una pequeña planta de moldeo de plástico por inyección. En este momento, Pratt tiene tres máquinas de moldeo idénticas y tiene 15 trabajos. Todos los clientes quieren sus trabajos ahora mismo, de manera que se quiere minimizar el tiempo tota! que todos los trabajos pasan esperando ser procesados. Los tiempos de procesamiento se muestran en la tabla 8-26. Los trabajos se numeraron en el orden TPC.

TABLA 8-26
Tiempos de procesado para Pratt Plastics

Trabajo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Tiempo	1	3	4	6	9	10	10	11	12	13	13	14	16	18	19

Solución. Minimizar el tiempo de espera es equivalente a minimizar el tiempo de flujo, así que se aplica el algoritmo de la lista TPC a los datos de la tabla 8-26. Al inicio no hay trabajos asignados a las máquinas, el primer trabajo de la lista se puede asignar a cualquier procesador. Los empates se rompen arbitrariamente, asignando el trabajo a la máquina con el menor número de identiñcación; entonces, el trabajo 1 se asigna a la máquina 1, y su tiempo de procesado *(j* = 1) se suma al tiempo de procesado total de la máquina 1 (H_i = 0 + 1 = 1). El segundo trabajo se asigna a la máquina 2 (H_2 = 3) y el tercero en la máquina 3 (H_3 = 4). Se asigna el cuarto trabajo a la máquina con menor carga, que es la máquina 1 {H_x = min {1,3,4}). Se suma el tiempo de procesamiento del trabajo 4 (p_A = 6) a la carga total de la máquina 1 (*H*, = 1), lo que da 7 periodos de tiempo de procesado en la máquina 1 (H_x = 1+6 = 7).

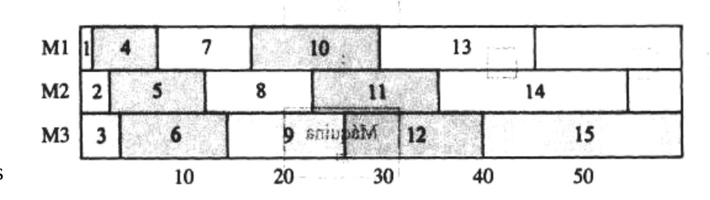


FIGURA 8-8
Gráfica de Gantt para el tiempo de flujo en procesadores paralelos

TABLA 8-27
Programa de tiempo de flujo mínimo para Praít

Máquina 1			Máquina 2			Máquina 3		
j	p_j	C_j	j	p_j	C_j	j	p_j	C_j
1	1	1	2	3	3	3	4	4
4	6	7	5	9	12	6	10	14
7	10	17	8	11	23	9	12	26
10	13	30	11	13	36	12	14	40
13	16	46	14	18	54	15	19	59

Se continúa de esta manera para llegar al programa óptimo que se resume en la tabla 8-27. La figura 8-8 contiene una representación pictórica mediante la gráfica de Gantt. Este programa tiene tiempo de flujo total de 372 unidades de tiempo.

4.2 Lapso de producción

Suponga que se quiere minimizar el lapso en lugar del tiempo de flujo. Desafortunadamente, no se cuenta con un algoritmo eficiente para minimizar el lapso, ni siquiera cuando se trata de sólo dos máquinas. Sin embargo, la lista del programa proporciona un buen heurístico.

Si alguna vez ha ayudado a alguien a cargar un camión, tal vez haya colocado los artículos más grandes primero y usado los más pequeños para llenar los espacios libres. La misma filosofía se aplica a la construcción de los programas que minimizan el lapso. Se usa primero una lista del tiempo de procesado más largo (TPL) y se asigna el siguiente trabajo en la lista a la máquina con el menor tiempo de procesado total asignado. Como antes, los empates se pueden romper de manera arbitraria, ya sea para los trabajos en lista o para las asignaciones en las máquinas.

Para el ejemplo anterior, la lista TPL es sólo la opuesta de la lista TPC. Primero se asigna el trabajo 15 a cualquiera de las tres máquinas, digamos a la máquina 1. Después se asigna el trabajo 14 a la máquina 2 y el 13 a la 3. Las tres máquinas tienen cargas de trabajo respectivas de 19, 18 y 16. El trabajo 12 es el siguiente en la lista y se asigna a la máquina 3, que tiene el menor tiempo de procesado. Está máquina tiene ahora 30 unidades de tiempo de procesado asignado. Se continúa de esta manera hasta asignar el resto de los trabajos. Los resultados se dan en la tabla £-28 y la gráfica de Gantt correspondiente se muestra en la figura 8-9. El lapso es 54 y está determinado por la máquina 2.

El programa de la figura 8-9 puede o no ser óptimo; él algoritmo de la lista TPL es un heurístico y no garantiza un programa óptimo. En la mayoría de los problemas este heurístico proporciona respuestas dentro de un 5% alejadas del óptimo, aunque existen ejemplos en los que el desempeño es peor. Matemáticamente, $e puede acotar el mal desempeño del algoritmo de la lista TPL. Sea C *^ el lapso óptimo y $C_{máx}$ (TPL) el lapso del programa construido con el algoritmo TPL. Se puede demostrar que

TABLA 8-28
Solución con lapso de producción mínimo para Pratt'

Máquina 1			Máquina 2			Máquina 3		
j	p_j	C_j	j	p_j	C_j	j	p_j	C_j
15	19	19	14	18	18	13	16	16
10	13	32	11	13	31	12	14	30
7	10	42	8	11	42	9	12	42
6	10	52	5	9	51	4	6	48
1	1	53	2	3	54	3	4	52

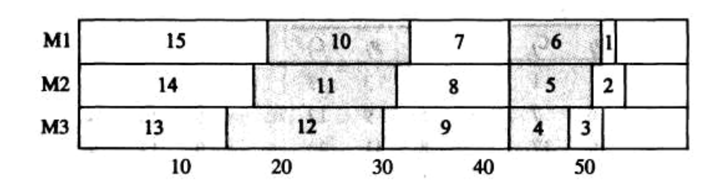


FIGURA 8-9
Granea de Gantt para el lapso de producción en procesadores paralelos

$$C_{\text{máx}}(\text{TPL})\Big/C^{*}_{\text{máx}} \leq \frac{4}{3} - \frac{1}{3}m$$

donde *m* es el número de máquinas (Graham, 1969). Así, para el problema de tres máquinas, no importa cuáles sean los datos, el algoritmo de la lista TPL nunca produjo un lapso mayor que 23% arriba del lapso óptimo. Éste es un resultado sorprendente, significa una garantía para el heurístico.

Si se permite la interrupción (es decir, que los trabajos se separen y se haga una parte en una máquina y el resto en otra), es sencillo obtener el programa de lapso mínimo. McNaughton (1959) demuestra que el lapso mínimo cuando se permite interrupción es

$$\underline{C}_{\text{máx}} = \text{máx}\left\{\max_{i=1,n} p_i,\ \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{n} p_i\right\}$$

De manera intuitiva si $\underline{C}_{\text{máx}} = \frac{1}{m}\sum_{i=1,n} p_i$ los trabajos se asignan a las máquinas tan parejo como se pueda. Para construir un programa con este lapso, se asignan trabajos de manera arbitraria a la máquina 1, hasta que el tiempo de procesado total es mayor que $C_{\text{máx}}$. Se interrumpe el último trabajo, moviendo a la máquina 2 la parte que excede a $C_{\text{máx}}$. Se continúa asignando trabajos a cada máquina de esta forma; al final se obtiene un programa sin tiempo ocioso y con lapso $\underline{C}_{\text{máx}}$. Si $\underline{C}_{\text{máx}} = \text{máx}_{i=1,n}\, p_i$, se programa el trabajo más largo en una máquina, se eliminan el trabajo y la máquina del problema y se procede como antes.

Para garantizar un programa con lapso mínimo sin interrupciones, se debe recurrir a algoritmos enumerativos como ramificación y acotamiento o programación dinámica. Sin embargo, el lapso proporciona una cota inferior sobre el lapso sin interrupciones. Para el ejemplo, C_{miac} = máx{19, 53}. Como el algoritmo de la lista TPL construyó un programa con lapso de 54, quedó dentro del 2% alejado del óptimo, que es lo suficientemente cercano para la mayor parte de las aplicaciones. Existe un programa mejor: intercambiar el trabajo 11 en la máquina 2 con el trabajo 9 en la 3, con esto todas las máquinas tienen 53 unidades de procesado, que es igual a la cota inferior y, por lo tanto, debe ser óptima.

En la figura 8-8 se ve que el lapso para el programa de tiempo de flujo mínimo era 59, mientras que en la figura 8-9 se observa que el tiempo de flujo para el programa TPL es 582. Si ambas medidas son importantes, ¿qué programa debe elegirse? De hecho, se puede mejorar mucho el tiempo de flujo del lapso mínimo con sólo invertir el orden de los trabajos en cada máquina, es decir, poniéndolos en el orden TPC. Esto no es lo mismo que el algoritmo de la lista TPC; todavía se hace la asignación según el TPL y se obtienen diferentes asignaciones de los trabajos a las máquinas. Para el ejemplo, al invertir el orden de los trabajos en las máquinas se reduce el tiempo de flujo a 372, que es igual al tiempo de flujo de la lista TPC. Para este ejemplo se puede tener el pastel y también comerlo, ya que se obtienen un buen lapso (54) y el tiempo de flujo óptimo (372) en el mismo programa. Esto sucedió por suerte y no necesariamente ocurrirá en otros problemas.

4.3 Otros modelos

Si la medida no es el lapso o el tiempo de flujo, el problema de programar máquinas paralelas idénticas es mucho más difícil. Si la medida es $T_{máx}$, la lista FEC parecería adecuada; para tiempo de flujo ponderado se usa TPPC. Es sencillo aplicar una extensión del algoritmo de Hodgson para tratar de minimizar el número de trabajos tardíos. Si lo que interesa es la tardanza, puede ser razonable una lista formada con el heurístico de R&M. Desafortunadamente, ninguno de ellos garantizan programas óptimos. El intercambio adyacente por pares puede mejorar la solución. Los procedimientos de búsqueda en una vecindad y simulación de recocido pueden adaptarse para resolver estos problemas. Los algoritmos especializados para otros problemas de máquinas paralelas se encuentran en Arkin y Roundy (1991), en Cheng y Chen (1994) y en So (1990).

Si los procesadores no son idénticos, el problema puede complicarse todavía más. Algunos sistemas paralelos tienen procesadores proporcionales o uniformes. En ese caso, el tiempo para hacer el trabajo *j* en la máquina *k e* $sp_{ik} = s_k p'_j$, donde s_k refleja la velocidad del procesador *k* y $p^f j$ es el tamaño del trabajo/ Así, si el trabajo *i* toma más tiempo en la máquina *k* que el trabajo *j*, tomará más tiempo que el trabajo *j* en cualquier máquina. Los procesadores no relacionados tienen tiempos de procesado p_{Jk} que varían por trabajo y máquina sin patrón aparente. Es difícil obtener soluciones óptimas para estos modelos, pero existen buenos heurísticos. Vea detalles en Morton y Pentico (1993) o en Cheng y Sin (1990).

SECCIÓN 4 EJERCICIOS

8.43. Determine el programa de flujo mínimo para los trabajos descritos en la tabla, procesados en tres máquinas idénticas. Compare el tiempo de flujo con la solución de una sola máquina.

Trabajo;	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Pi	**16**	**9**	**10**	**8**	**5**	**11**	**15**	**6**	**3**	**19**
Trabajo/	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**
Pi	**8**	**4**	**3**	**11**	**5**	**1**	**11**	**10**	**6**	**5**

8.44. Gerry, el mecánico del ejercicio 8.5, puede contratar otro mecánico para ayudarlo a reparar seis automóviles. El mecánico cuesta $10 por hora y debe trabajar un mínimo de cuatro horas. ¿Qué costo por hora tendrá que asignar Gerry al tiempo de espera del cliente para justificar la contrata ción del mecánico?

8.45. AutoElectric produce cables y partes eléctricas para automóvil. Tienen seis órdenes relevantes para cable recubierto. Los tiempos de procesado (en horas) son

Trabajo	**12**		**3**	**4**	**5**	**6**
Tiempo	**5**	**5**	**9**	**2**	**6**	**3**

Tienen dos máquinas para recubrir idénticas. ¿Qué programa recomendaría para minimizar el tiempo de flujo?

8.46. PowerTransfer fabrica engranes de precisión grandes que se usan en equipo pesado. Se hacen mediante troquelado y tienen dos troqueles idénticos. Actualmente, son cinco los engranes que deben terminarse para mañana. La compañía sólo cuenta con un turno de trabajadores, pero les puede pagar horas extra para terminar los engranes. Todos los trabajadores del turno se quedan hasta que

terminan todos los trabajos. Los tiempos respectivos para procesar los cinco trabajos son 3,7,2, 15 y 4 horas. ¿Qué programa recomendaría para este problema? Explique.

8.47. Suponga que PowerTransfer (ejercicio 8.46) recibe el pago tan pronto como entrega los engranes. ¿Qué programa recomendaría para este problema? Explique todas las suposiciones que haga y por qué recomienda el programa.

5 TALLERES DE PRODUCCIÓN CONTINUA

El procesado de trabajos de manera secuencial en varias máquinas, recibe el nombre de producción continua. Todos los trabajos se procesan en el mismo orden, por lo que se pueden numerar las máquinas de manera que la máquina 1 hace la primera operación y así sucesivamente. La figura 8-10 describe un taller de producción continua. Las células dedicadas son buenos ejemplos de producción continua. Una familia, o un grupo, de partes se produce en una célula. Cada parte visita, en el mismo orden, las máquinas que componen una célula. Se supone que cada parte debe procesarse en todas las máquinas; si no es así, el tiempo de procesado en una máquina que no es necesaria para un trabajo se iguala a cero. Sólo unos cuantos de estos modelos tienen una solución sencilla. Se comienza con el modelo del lapso de producción para dos máquinas.

5.1 Lapso en un taller de producción continua con dos máquinas: algoritmo de Johnson

MetalFrame fabrica marcos de metal para puertas. La preparación del embisagrado es una operación de dos pasos. Primero el montaje se forma en una laminadora rodante (máquina 1), después se incrusta el patrón de la bisagra usando una prensa (máquina 2). Se hacen cuatro tipos diferentes de montajes para distintos clientes de MetalFrame. Los tiempos de procesado para los cuatro trabaja actuales (lotes de los diferentes tipos) en cada máquina se dan en la tabla 8-29. El programa "natural" (trabajo 1 primero, trabajo 2 después, etc.) se describe en la gráfica de Gantt de la figura 8-11. El lapso de este programa es 22. ¿Es óptimo este programa?

Al examinar este programa se observa que hay tiempo ociosa Gomo, en este caso, minimizar el lapso es equivalente a minimizar el tiempo ocioso, si se tuviera un tiempo ocioso de cero, el programa sería óptimo» Sin embargo, en la producción continua es imposible tener cero tiempo ocioso. Debido a que el primer trabajo programado en la máquina 2 no puede comenzar hasta que termine en la máquina 1, la máquina 2 debe estar ociosa Bufante este tiempo. De manera similar, la máquina 1 debe estar ociosa mientras se procesa el último trabajo en la máquina 2. (Por supuesto, si se dispone de otros trabajos además de los que están bajo consideración, se pueden procesar en estos tiempos.) Otros tiempos ociosos (como el que hay entre los trabajos 1 y 2 en la máquina 2) pueden no ser necesarios.

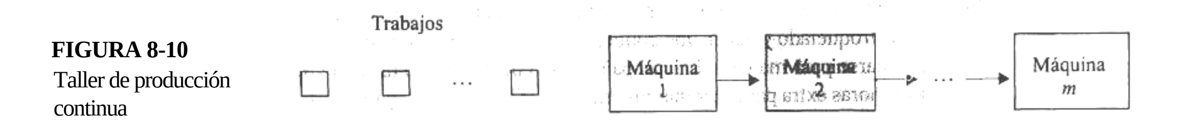


FIGURA 8-10
Taller de producción continua

TABLA 8-29
Tiempos de procesado para las operaciones de embisagrado

Máquinas	Trabajos 1	2	3	4	Tiempo total
1	5	4	3	2	14
2	2	5	2	6	15

Ahora considere el programa 4-2-3-1 descrito en la figura 8-12. Su lapso es 17, por lo que 1-2-3-4 no es óptimo. ¿Es óptimo 4-2-3-1? Es claro que el lapso debe ser tan grande como la suma de los tiempos de procesado en cualquiera de las máquinas, es decir,

$$C^*_{\text{máx}} \geq \text{máx}\left\{\sum_{i=1}^{n} p_{i1},\ \sum_{i=1}^{n} p_{i2}\right\}$$

Al entender que el tiempo ocioso de la máquina 1 al final del programa y el de la máquina 2 al principio son inevitables, se puede ajustar la cota. No se sabe qué trabajo debe ser el primero, y su tiempo de procesamiento en la máquina 1 determina el tiempo ocioso inevitable en la máquina 2, entonces, ¿qué debe hacerse para aumentar la cota? Ese tiempo ocioso debe ser al menos tan grande como el menor tiempo de procesado en la máquina 1. De igual manera, el tiempo ocioso inevitable de la, máquina 1 debe ser igual o mayor que el tiempo de procesado más pequeño en la máquina 2. Esto lleva a una mejor cota sobre el lapso:

$$C^*_{\text{máx}} \geq \text{máx}\left\{\left(\min_{i=1,n} p_{i2} + \sum_{i=1}^{n} p_{i1}\right),\ \left(\min_{i=1,n} p_{i1} + \sum_{i=1}^{n} p_{i2}\right)\right\}$$

Al calcular esta cota se ve que $C^*_{\text{máx}} \geq 17$ y, por lo tanto, el programa 4-2-3-1 es óptimo. Del examen de la cota sobre el lapso surge la idea de un algoritmo. Si un trabajo tiene un tiempo de procesado corto en la máquina 1, parecería que debe ir al principio del programa, mientras que uno con un tiempo corto en la segunda máquina debe programarse al final. Esto lleva al algoritmo de Johnson (Jofanson, 1954):

Paso 0. Sean $U = \{1, 2, \ldots, n\}$ el conjunto de trabajos no programados, $k = 1$, $\ell = n$ y $J_i = 0$, $i = 1, 2, \ldots, n$.

Paso 1. Si $U = \varnothing$, se va al paso 4. Sea

$$p_{i^*j^*} = \min\left\{\min_{i=1,n} p_{i1},\ \min_{i=1,n} p_{i2}\right\}$$

Si $j^* = 1$, se va al paso 2; de otra manera se va al paso 3.

Paso 2. Se programa el trabajo i^* en la posición más cercana disponible (k) de la secuencia, se actualiza k y se elimina el trabajo del conjuntó programable. Se hace $J_k = i^*$, $k = k + 1$ y $U = U - \{i^*\}$.Se va al paso 1.

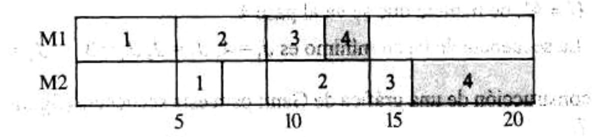


FIGURA 8-11
Programa "natural" para MetalFrame

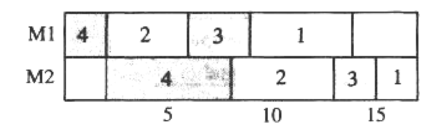


FIGURA 8-12
Otro programa para MetalFrame

Paso 3. Se programa el trabajo i^* en la posición más lejana disponible (ℓ), se actualiza ℓ y se elimina el trabajo del conjunto programable. Se hace $J_\ell = i^*$, $\ell = \ell - 1$ y $U = U - \{i^*\}$. Se va al paso 1.

Paso 4. La secuencia de trabajos está dada por J_i, con J_1 como el primer trabajo, etcétera.

Para determinar el programa real se construye la gráfica de Gantt. Sea H_j el tiempo de terminación del último trabajo programado en la máquina j y c_j el tiempo de terminación del trabajo i en la máquina j. Para calcular los tiempos de terminación de cada operación en cada máquina se hace lo siguiente:

Paso 0. Se hace $k = 1$, $H_j = 0$, $j = 1, 2$, $c_{ij} = 0$, $i = 1, 2, \ldots, n$; $j = 1, 2$.

Paso 1. Sea $i = J_k$. Se hace $c_{i1} = H_1 + p_{j1}$, $c_{j2} = \text{máx}\{H_2, c_{i1}\} + p_{i2}$.

Paso 2. Se sustituye $H_j \leftarrow c_{ij}$, $j = 1, 2$. Se hace $k = k + 1$; si $k \leq n$, se va al paso 1.

El algoritmo de Johnson siempre genera un programa óptimo. El tiempo de inicio de cada trabajo en cada máquina es el tiempo de terminación menos el tiempo de procesado. La gráfica de Gantt se construye con facilidad si se usan los tiempos de inicio.

Ejemplo 8-16. Algoritmo de Johnson. Si se aplica el algoritmo de Johnson a los datos de MetalFrame (tabla 8-29) se tiene lo siguiente:

Paso 0. $U = \{1, 2, 3, 4\}$, $k = 1$, $\ell = 4$ y $J_1 = J_2 = J_3 = J_4 = 0$.

Paso 1. U no es vacío. El trabajo 1 tiene el menor tiempo de procesado ($p_{12} = 2$) entre los trabajos en U. (Los empates se rompen arbitrariamente.) Por lo tanto, $i^* = 1$ y $j^* = 2$. Como $j^* = 2$, se va al paso 3.

Paso 3. Se hace $J_4 = 1$, $\ell = 4 - 1 = 3$ y $U = \{2, 3, 4\}$ y se va al paso 1.

Paso 1. U no es vacío. El trabajo 4 tiene el menor tiempo de procesado ($p_{41} = 2$) entre los trabajos en U. Por lo tanto, $i^* = 4$ y $j^* = 1$. Como $j^* = 1$, se va al paso 2.

Paso 2. Se hace $J_1 = 4$, $k = 1 + 1 = 2$ y $U = \{2, 3\}$ y se va al paso 1.

Paso 1. U no es vacío. El trabajo 3 tiene el menor tiempo de procesado ($p_{32} = 2$) entre los trabajos en U. Por lo tanto, $i^* = 3$ y $j^* = 2$. Como $j^* = 2$, se va al paso 3.

Paso 3. Se hace $J_3 = 3$, $\ell = 3 - 1 = 2$ y $U = \{2\}$ y se va al paso 1.

Paso 1. U no es vacío, el trabajo 2 tiene el menor tiempo de procesado ($p_{21} = 4$) entre los trabajos de U. Por lo tanto, $i^* = 2$ y $j^* = 1$. Como $j^* = 1$, se va al paso 2.

Paso 2. Se hace $J_2 = 2$, $k = 2 + 1 = 3$ y $U = \varnothing$ y se va al paso 1.

Paso 1. $U = \varnothing$, de manera que se va al paso 4.

Paso 4. La secuencia de lapso mínimo es $J_1 = 4$, $J_2 = 2$, $J_3 = 3$ y $J_4 = 1$.

Con la construcción de una gráfica de Gantt para esta secuencia (figura 8-12) se encuentra que el lapso es 17.

5.2 Lapso de producción con más de dos máquinas

Si se tienen más de dos máquinas, el algoritmo de Johnson no funciona excepto en casos especiales. Un caso especial ocurre cuando la máquina intermedia está dominada, ya sea por la primera o por la tercera. Una máquina está dominada cuando su tiempo de procesado más largo no es mayor que el tiempo de procesado más corto de otra máquina, es decir, para la máquina intermedia de tres máquinas,

$$p_{i2} \leq \text{máx}\left\{\min_i p_{i1},\ \min_i p_{i3}\right\}$$

Entonces se puede formar un problema equivalente de dos máquinas con tiempos de procesado

$$p'_{i1} = p_{i1} + p_{i2} \qquad \text{y} \qquad p'_{i2} = p_{i2} + p_{i3}$$

Al resolver este problema de dos máquinas se obtiene la secuencia de lapso óptimo para el problema dominado de tres máquinas. Un trabajo comienza en una máquina tan pronto como el trabajo anterior en esa máquina termina, o su operación en la máquina anterior termina. Esto funciona porque en un problema dominado, la máquina 2 nunca causa un retraso en el programa.

Para problemas de dos máquinas y problemas de tres máquinas con la máquina 2 dominada, el programa óptimo es un **programa de permutación.** Esto es, la secuencia de trabajos es la misma en todas las máquinas. Un programa de no permutación tiene diferentes secuencias de trabajo en al menos dos máquinas. Suponga que el trabajo i está programado antes del trabajo j en la máquina k, pero en la máquina $k + 1$ se procesa j antes de i. El trabajo i pudo haberse procesado en la máquina $k + 1$, mientras j estaba en la máquina k, de manera que hay tiempo ocioso insertado en la máquina $k + 1$. Si el objetivo es el lapso de producción, se puede demostrar que un programa óptimo es un programa de permutación para tres máquinas. Sin embargo, para cuatro o más máquinas, el programa óptimo puede no ser un programa de permutación. Para otros objetivos, los problemas de tres máquinas no tienen garantía de programas de permutación óptimos. Si no hay una máquina dominante en un problema de tres máquinas, o si se tienen más de tres máquinas, no existe una manera sencilla de obtener una solución óptima. Debe recurrirse a algoritmos heurísticos o enumerativos para resolver estos problemas.

5.2.1. Algoritmos heurísticos

Un algoritmo heurístico directo es forzar al problema para que se vea como uno de dos máquinas y usar el algoritmo de Johnson. Esta secuencia se convierte en un programa de permutación para el problema original. Los diferentes enfoques para convertir el problema de m máquinas en un problema de dos máquinas producen programas distintos, entonces se puede elegir el mejor de ellos.

Cambell, Dudek y Smith (1970) propusieron un enfoque de conversión, el heurístico CDS. Sean p'_{iX} y p'_{i2} los tiempos de procesado para el problema de dos máquinas. Entonces, para un problema de m máquinas, se tiene

$$p'_{i1} = \sum_{j=1}^{k} p_{ij} \qquad \text{y} \qquad p'_{i2} = \sum_{j=\ell}^{m} p_{ij}$$

Ellos sugieren comenzar con i = l y / = wy generar un programa con el algoritmo de Johnson. Después se hace fc=2y/=m-lyse repite, continuando hasta que ¿ = m - 1 y / = 2. Se usa el mejor de los *m* - 1 programas generados. Existen otras formas para generar los tiempos de procesado para seudomáquinas.

Gupta (1972) propuso otro algoritmo heurístico. Sea

$$e_i = \begin{cases} 1 & \text{si } p_{i1} < p_{im} \\ -1 & \text{si } p_{i1} \geq p_{im} \end{cases}$$

y defina

$$s_i = \frac{e_i}{\text{mín}_{k=1,m-1}\{p_{ik} + p_{ik+1}\}}$$

Se determina una secuencia de permutación--mediante $s_{[1]} \geq s_{[2]} \geq \ldots > s_{[n]}$. Gupta basa esta regla en el algoritmo de Johnson para una máquina intermedia dominada, porque es exacto para ese caso.

Ejemplo 8.17. Heurístico de producción continua para Cincron. Chantel DeVillez es la supervisora para la célula de aspas. En esta célula se procesan cinco tipos distintos de aspas para turbina. La célula consiste en cuatro máquinas que procesan cada aspa en forma secuencial. Los datos del procesado se muestran en la tabla 8-30. Chantel desea terminar todas las aspas tan pronto como sea posible.

TABLA 8-30
Datos de la célula de Ciñeron

Trabajo	1	2	3	4	5
Máquina 1	1	10	17	12	11
Máquina 2	13	12	9	17	3
Máquina 3	6	18	13	2	5
Máquina 4	2	18	4	6	16

Solución. Primero se usa el heurístico CDS para generar tres programas. Se resuelve el problema usando los tiempos de procesado de las máquinas 1 y 4. Los datos de este problema se encuentran en la primera sección de la tabla 8-31. Al resolverlo con el algoritmo de lohnson se obtiene el programa 1-2-5-4-3 con un lapso de 88. Después se combinan los tiempos de procesado en las máquinas 1 y 2 para obtener los tiempos de procesado de la seudomáquina 1 y los tiempos de procesado en las máquinas 3 y 4 para obtener los tiempos de la segunda seudomáquina. Estos tiempos y la secuencia producida por el algoritmo de Johnson se dan en la segunda parte de la tabla 8-31. Por último, se combinan los tiempos de procesado de las máquinas 1, 2 y 3 para la seudomáquina 1 y los tiempos de procesado de las máquinas 2,3 y 4 para la seudomáquina 2. Este problema y la secuencia se dan en la última sección de la tabla 8-31. Las dos secuencias 5-2-3-1-4 y 5-1-2-3-4 producen programas con lapso de 85. En la figura 8-13 se muestra la gráfica de Gantt para 5-1 -2-3-4, la mejor secuencia CDS. Los tiempos de procesado se colocaron abajo del número del trabajó para cada operación.

TABLA 8-31
Cálculos para el heurístico CDS para Cincron

j	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
p_1	1	10	17	12	11	14	22	26	29	14	20	40	39	31	19
p_2	2	18	4	6	16	8	36	17	8	21	21	48	26	25	24
$[j]$	1	2	5	4	3	4	2	3	5	1	2	3	4	5	1
	1-2-5-4-3	$C_{máx} = 88$				5-2-3-1-4	$C_{máx} = 85$				5-1-2-3-4	$C_{máx} = 85$			

El mismo ejemplo se resolvió usando el heurístico de Gupta. La tabla 8-32 proporciona los cálculos y *h* figura. 8-14 describe la gráfica de Gantt Este programa, pon un lapso de 80, es mejor que cualquiera de los programas CPS. Aunque el heurístico de Gupta fue mejor en este caso, CDS puede dar mejores resultados en otros. La enumeración total muestra que el programa de Gupta es el mejor programa de permutación.

TABLA 8-32
Cálculos para Cincron con el heurístico de Gupta

Trabajo	Cálculos						[i]
	$p_1 + p_2$	$p_2 + p_3$	$p_3 + p_4$	mín	e_i	s_i	
1	14	19	8	8	1	0.12	1
2	22	30	36	22	1	0.05	3
3	26	22	17	17	−1	−0.06	4
4	29	19	8	8	−1	−0.12	5
5	14	8	21	8	1	0.12	2

5.2.2 Enfoques de ramificación y acotamiento

Es difícil encontrar programas de lapso óptimo para más de tres máquinas. Lo mejor que se puede esperar es encontrar la mejor secuencia de permutación. Esto se puede hacer con el método de ramificación y acotamiento. Se describe un algoritmo de ramificación y acotamiento que usa cotas simples basadas en las máquinas y en los trabajos. En la literatura sobre programación de la producción se pueden encontrar otros enfoques más elaborados. Para un taller de producción continua con dos máquinas,

$$C^*_{\text{máx}} \geq \text{máx}\left\{\left(\min_{i=1,n} p_{i2} + \sum_{i=1}^{n} p_{i1}\right), \left(\min_{i=1,n} p_{i1} + \sum_{i=1}^{n} p_{i2}\right)\right\}$$

es una cota sobre el lapso. Suponga que se tiene un programa parcial y que *U* es el conjunto de trabajos no programados. Sea H_j el tiempo de terminación actual del último trabajo programa-

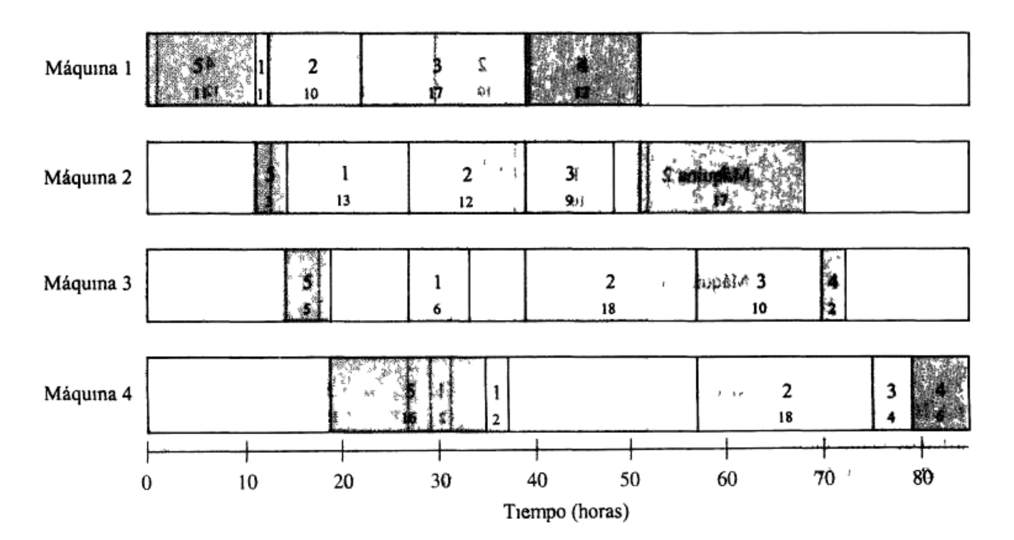


FIGURA 8-13
Gráfica de Gantt para el programa CDS

do en la máquina j. Si hay tres máquinas, el lapso en la máquina 1 debe ser al menos el tiempo de terminación actual más el tiempo para procesar los trabajos no programados más el tiempo para hacer el último trabajo en las máquinas 2 y 3. Como no se sabe qué trabajo será el último, debe usarse la suma mínima de los tiempos de procesado para todos los trabajos no programados en las máquinas 2 y 3. Matemáticamente, se tiene

$$C^*_{\text{máx}} \geq H_1 + \sum_{i \in U} p_{i1} + \min_{i \in U}\{p_{i2} + p_{i3}\}$$

Para la segunda máquina, se deben procesar los trabajos en U, y el último trabajo programado en la máquina 2 también debe programarse en la máquina 3. Como no se conoce el orden de los trabajos en U, se debe usar el menor tiempo de procesado en la máquina 3. Los trabajos en U no pueden comenzar en la máquina 2 hasta H_2, o hasta que el primer trabajo programado de U termine en la máquina 1. De nuevo, no se conoce el orden de los trabajos en (7, por lo que se usa el menor tiempo de procesado en la máquina 1 más //,. La cota es

$$C^*_{\text{máx}} \geq \text{máx}\left\{\left[H_1 + \min_{i\in U}\{p_{i1}\}\right], H_2\right\} + \sum_{i\in U} p_{i2} + \min_{i\in U}\{p_{i3}\}$$

De manera similar, para la máquina 3 se puede usar la cota

$$C^*_{\text{máx}} \geq \text{máx}\left\{\left[H_1 + \min_{i\in U}\{p_{i1} + p_{i2}\}\right], \left[H_2 + \min_{i\in U}\{p_{i2}\}\right], H_3\right\} + \sum_{i\in U} p_{i3}$$

Éstas son cotas basadas en la máquina, es decir, examinan lo que puede ocurrir en cada máquina. También pueden obtenerse cotas basadas en los trabajos. Una cota trivial basada en los trabajos es la suma de los tiempos de procesado en todas las máquinas para cualquier trabajo no programado. £1 máximo sobre todos los trabajos programados se puede sumar a //,:

$$C^*_{\text{máx}} \geq H_1 + \text{máx}_{i \in U}\left\{\sum_{j=1}^{m} p_{ij}\right\}$$

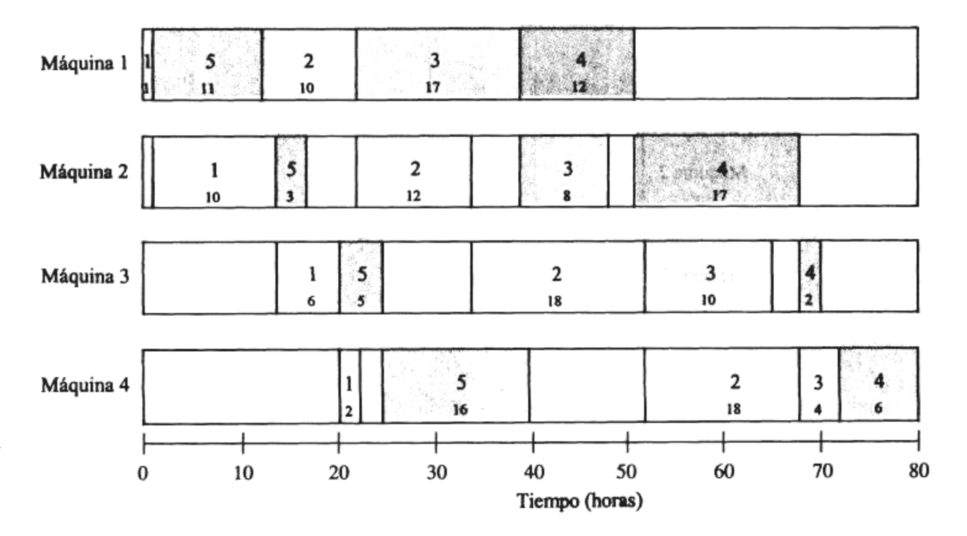


FIGURA 8-14. Gráfica de Gantt para el programa heurístico de Gupta

Si U consiste en más de un trabajo y el trabajo k es el primero programado, los otros trabajos en U le siguen. Si / se programa al último, los otros trabajos le preceden; de otra manera, algunos le preceden y otros le siguen. Una cota legítima para el trabajo i es

$$C_{\text{máx}} \geq H_1 + \max_{i \in U} \left\{ \sum_{j=1}^{m} p_{ij} + \sum_{k \in U, k \neq i} \text{mín}\{p_{k1}, \ p_{k3}\} \right\}$$

Se pueden desarrollar cotas similares basadas en los trabajos para las máquinas 2 y 3. Si hay más de tres máquinas, tanto las cotas basadas en las máquinas como las basadas en los trabajos se pueden extender con facilidad. Pueden desarrollarse otras cotas para el modelo de producción continua.

Las ramas del árbol corresponden a los trabajos en una posición de la secuencia, comenzando con la primera posición. Una solución heurística, por ejemplo, CDS o Gupta, proporciona una solución incumbente. Cualquier nodo con una cota mayor que o igual a la solución incumbente se puede podar. Si se encuentra una solución mejor que la incumbente, la sustituye. Idealmente, las cotas podarán muchas de las ramas, ya que el primer nivel puede tener n nodos, cada uno con otros n - 1, etcétera. Se ilustra con un ejemplo:

Ejemplo 8-18. Ramificación y acotamiento para producción continua. Suponga que se quiere encontrar el programa de permutación con el mejor lapso. La tabla 8-33 contiene los tiempos de procesado.

Solución. El algoritmo de ramificación y acotamiento comienza sin trabajos programados. Entonces H_x = $H_2 = H_3 = 0$ y U = {1,2,3,4,5}. Se aplica el algoritmo CDS para obtener una secuencia incumbente de 1-2-3-4-5 con lapso de 65. Ahora se calcula la cota inferior inicial.

$$\text{M1:} \quad C^*_{\text{máx}} \geq H_1 + (p_{11} + p_{21} + p_{31} + p_{41} + p_{51})$$
$$+ \ \text{mín}\{p_{12} + p_{13}, \ p_{22} + p_{23}, p_{32} + p_{33}, p_{42} + p_{43}, p_{52} + p_{53}\}$$
$$= 0 + (1 + 10 + 17 + 12 + 11) + \text{mín}\{19, 30, 22, 19, 8\} = 51 + 8 = 59$$

$$\text{M2:} \quad C^*_{\text{máx}} \geq \text{máx}\{[H_1 + \text{mín}\{p_{11}, p_{21}, p_{31}, p_{41}, p_{51}\}], H_2\}$$
$$+ \ (p_{12} + p_{22} + p_{32} + p_{42} + p_{52}) + \text{mín}\{p_{13} + p_{23} + p_{33} + p_{43} + p_{53}\}$$
$$= \text{máx}\{[0 + \text{mín}\{1, 10, 17, 12, 11\}], 0\}$$
$$+ (13 + 12 + 9 + 17 + 3) + \text{mín}\{6, 18, 13, 2, 5\}$$
$$= 1 + 54 + 2 = 57$$

$$\text{M3:} \quad C^*_{\text{máx}} \geq \text{máx}\{[H_1 + \text{mín}\{p_{11} + p_{12}, p_{21} + p_{22}, p_{31} + p_{32}, p_{41} + p_{42}, p_{51} + p_{52}\}],$$
$$[H_2 + \text{mín}\{p_{12}, p_{22}, p_{32}, p_{42}, p_{52}\}], H_3\} + (p_{13} + p_{23} + p_{33} + p_{43} + p_{53})$$
$$= \text{máx}\{[0 + \text{mín}\{14, 22, 26, 29, 14\}],$$
$$[0 + \text{mín}\{13, 12, 9, 17, 3\}], \ 0\} + (6 + 18 + 13 + 2 + 5)$$
$$= \text{máx}\{14, 3, 0\} + 44 = 58$$

TABLA 8-33
Datos de ramificación y acotamiento para producción continua

	Trabajo i				
Máquina j	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
1	1	10	17	12	11
2	13	12	9	17	3
3	6	18	13	2	5

Las cotas basadas en los trabajos son las siguientes:

$$C_{\text{máx}} \geq H_1 + \sum_{j=1}^{3} p_{1j} + \sum_{k \in \{2,3,4,5\}} \text{mín}\{p_{k1}, p_{k3}\}$$

$$\begin{aligned} \text{J1:} \quad C^*_{\text{máx}} &\geq H_1 + (p_{11} + p_{12} + p_{13}) \\ &\quad + (\text{mín}\{p_{21}, p_{23}\} + \text{mín}\{p_{31}, p_{33}\} + \text{mín}\{p_{41}, p_{43}\} + \text{mín}\{p_{51}, p_{53}\}) \\ &= 0 + (1 + 13 + 6) + (\text{mín}\{10, 18\} + \text{mín}\{17, 13\} + \text{mín}\{12, 2\} + \text{mín}\{11, 5\}) \\ &= 0 + 20 + (10 + 13 + 2 + 5) = 50. \end{aligned}$$

De manera similar, se tiene

$$\begin{aligned} &\text{J2:} \quad C^*_{\text{máx}} \geq 61 \\ &\text{J3:} \quad C^*_{\text{máx}} \geq 57 \\ &\text{J4:} \quad C^*_{\text{máx}} \geq 60 \\ &\text{J5:} \quad C^*_{\text{máx}} \geq 45 \end{aligned}$$

La mejor cota, 61, está dada por J2. Corno 61 < 65, la cota superior de CDS, debe ramificarse. Se forman cinco nodos que salen del nodo todo Ubre, uno con cada trabajo en primera posición.

Por brevedad, sólo se examinarán con detalle unos cuantos nodos del árbol. En la figura 8-15, el valor de la cota va seguido por la máquina o el trabajo que causa que el nodo quede sondeado. El cálculo de las cotas se detiene en cuanto una cota excede o iguala la solución incumbente. Las cotas se calcularon en el orden MI, M2, M3, Jl, J2, J3, J4 y J5.

Cuando el trabajo 2 está fijo como primero en la secuencia, se tiene $H_x = 10$, $H_2 = 22$, $H_3 = 40$ y £/= {1,3,4, 5}. Las cotas son

$$\begin{aligned} &\text{M1:} \quad C^*_{\text{máx}} \geq 59 \\ &\text{M2:} \quad C^*_{\text{máx}} \geq 66 \end{aligned}$$

Esto es mayor que la cota superior, lo que significa que no es necesario considerar los programas con el trabajo 2 primero, entonces se sondea el nodo. Todos los nodos con trabajos en primera posición distintos al trabajo l,se pueden sondear de manera parecida.

Ahora considere el nodo con el trabajo 1 primero y el trabajo 3 en segundo lugar. Al calcular los tiempos de terminación se obtiene $H_x = 18$, //¿ = 27, $H_3 = 40$ y $U = \{2,4, 5\}$ con cotas:

$$\begin{aligned} &\text{M1:} \quad C^*_{\text{máx}} \geq 59 \\ &\text{M2:} \quad C^*_{\text{máx}} \geq 62 \\ &\text{M3:} \quad C^*_{\text{máx}} \geq 65 \end{aligned}$$

así que se sondea el nodo. Sólo el nodo que representa el trabajo 1 primero y el trabajo 2 segundo permanece sin sondear.

Ahora se examina el nodo con la secuencia 1-2-3, con $H_l = 28$, $H_2 = 37$, $H_3 = 57$ y $U = \{4,5\}$. Las cotas son

$$\begin{aligned} &\text{M1:} \quad C^*_{\text{máx}} \geq 59 \\ &\text{M2:} \quad C^*_{\text{máx}} \geq 61 \\ &\text{M3:} \quad C^*_{\text{máx}} \geq 64 \end{aligned}$$

Las cotas basadas en las máquinas no sondearon el nodo, de manera que se calculan las cotas basadas en los trabajos. Éstas sólo se calculan para trabajos no programados.

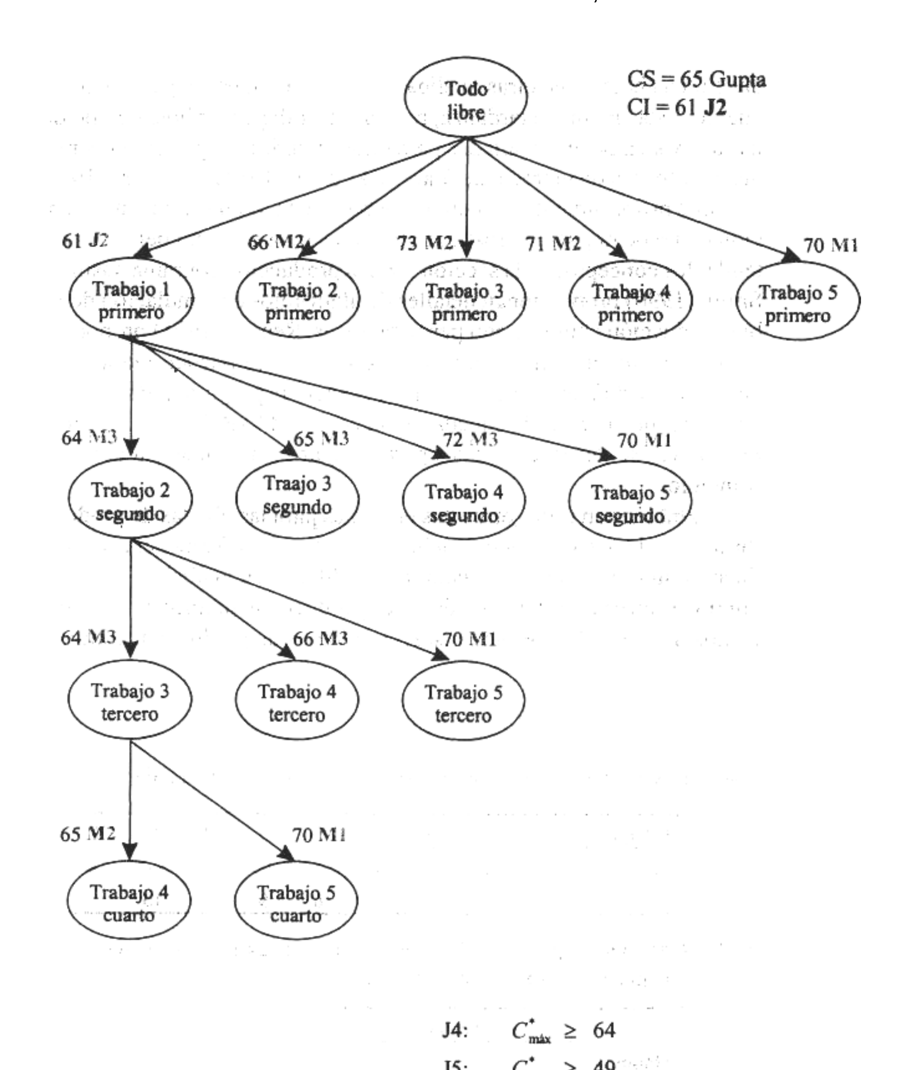


FIGURA 8-15
Árbol de ramificación y acotamiento para producción continua

J4: $C^{*}_{\text{máx}} \geq 64$

J5: $C^{*}_{\text{máx}} \geq 49$

La mejor cota para este nodo es 64 (M3 y J4), de manera que ahora deben crearse dos nodos, uno con el trabajo 4 en cuarto lugar y otro con el trabajo 5 en cuarto lugar. Estos nodos sólo tienen un trabajo no programado y es sencillo evaluarlos.

Los siguientes cálculos sondearán estos nodos, y el algoritmo de ramificación y acotamiento queda completo. Se confirma que el programa de permutación óptima es 1-2-3-4-5 con un lapso de 65. Como los programas de permutación son dominantes para el modelo del lapso con tres máquinas, es el mejor programa posible. El programa parcial 1-3 tiene una ¿ota de 65 y podría generar un programa alternativo óptimo.

5.3 Otras medidas

El lapso de producción se centra en la utilización de la máquina. Tradicionalmente, la utilización ha sido la medida de desempeño más común; pero el cambio rápido en el entorno de pro-

ducción ha hecho que otras medidas sean importantes, en particular las medidas del servicio al cliente. Éstas incluyen tardanza, número de trabajos tardíos, tiempo de flujo ponderado y adelanto. Existen pocos resultados para otras medidas. Se pueden encontrar heurísticos relacionados con fechas de entrega en Grabowski *et al.* (1983) y en Kim (1993).

Los procedimientos generales de búsqueda, como la búsqueda en una vecindad y simulación de recocido, son heurísticos atractivos para estos modelos. Es relativamente sencillo extender los conceptos de la sección 3.8 a la producción continua. Osman y Potts (1989) y Ogbu y Smith (1990) proporcionan detalles de algoritmos de simulación de recocido para el lapso sobre producción continua con permutaciones. Reeves (1995) proporciona algoritmos genéticos para el mismo problema. Estos procedimientos se pueden modificar para que funcionen con cualquier medida para la que se pueda evaluar un programa. Para programación de permutaciones se pueden usar las búsquedas en la vecindad IAP, IP e IN. En cuanto a la efectividad computacional, se necesitan formas para evaluar las medidas sin generar los programas desde el principio.

También son útiles otros dos enfoques para las plantas de producción continua, los procedimientos de despacho y de cuello de botella. Con frecuencia se usan para programar la producción intermitente, de manera que se diferirá su análisis. Como las plantas de producción continua son casos especiales de las de producción intermitente, debe ser sencillo usar los algoritmos de estos últimos para resolver modelos de producción continua.

SECCIÓN 5 EJERCICIOS

8.48. Resuelva el siguiente problema de dos máquinas en un taller de producción continua.

Tabajo i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p_{i1}	10	2	4	8	5	12	7	—	14
p_{i2}	2	4	5	8	6	9	—	15	—

8.49. Considere el programa 3-2-1-4 con lapso de 24 para el siguiente problema de tres máquinas en una planta de producción continua.

	Trabajos			
Máquina	1	2	3	4
A	3	2	1	8
B	5	1	8	7
C	7	4	2	2

a) Dibuje una granea de Gantt para el problema.
b) Demuestre que el programa es óptimo.

8.50. Un procesador comercial de negativos tiene 10 trabajos que necesitan procesarse a través de dos operaciones. Todos los trabajos se hacen en la operación 1 primero y en la operación 2 después. Los tiempos dependen de la película en particular y el resultado deseado. Los tiempos de procesado para los trabajos (en minutos) son:

Trabajo i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p_{i1}	18	7	29	3	20	7	11	2	13	13
p_{i2}	19	8	11	14	15	6	28	17	16	10

El operador puede irse a casa en cuanto todos los trabajos estén terminados. ¿Qué programa le recomendaría?

8.51. Considere los siguientes datos de un taller de producción continua con tres máquinas:

Trabajo *i*	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Pn	**2**	**23**	**25**	**5**	**15**	**10**
Pn	**29**	**3**	**20**	**7**	**11**	**2**
Pi3	**19**	**8**	**11**	**14**	**7**	**4**

a) Aplique el heurístico CDS y dibuje la gráfica de Gantt para el programa que se obtiene. *b)* Aplique el heurístico de Gupta y dibuje la gráfica de Gantt para el programa que se obtiene.

8.52. Los datos de un taller de producción continua con cuatro trabajos y seis máquinas se dan enseguida:

Trabajo *i*	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Pn	**18**	**14**	**25**	**29**	**7**	**21**
Pn	**2**	**23**	**25**	**5**	**15**	**6**
Pi2	**28**	**3**	**22**	**6**	**25**	**19**
PíA	**16**	**11**	**26**	**1**	**16**	**21**

a) Obtenga un programa con un buen lapso para el problema. *b)*
¿Cuál es el lapso óptimo para este problema?

8.53. Una célula que contiene tres máquinas fabrica una familia de partes. La familia tiene cuatro partes y, en esencia, el tiempo de preparación para cambiar de una parte a otra es cero. Cada parte sigue la misma rutina a través de la célula (suponga A -» B -> C). La demanda de cada parte es la misma, así que se quiere usar un programa cíclico, es decir, un programa que se repita todo el día para las cuatro partes. La matriz de tiempos de procesado para las cuatro partes en las tres máquinas se da en la tabla. ¿Qué programa recomendaría para que el número de ciclos sea el menor posible, es decir, para *maximizar* el número de partes producidas en un turno de ocho horas?

	Máquina		
Parte	**A**	**B**	**C**
1	**5**	**7**	**12**
2	**4**	**3**	**8**
3	**9**	**6**	**7**
4	**7**	**5**	**11**

8.54. Demuestre que los programas de permutación no siempre son óptimos para producción continua, es decir, proporcione un contraejemplo.

8.55. Considere el problema NP-duro de minimizar el tiempo de flujo en un taller de producción conti nua con dos máquinas. Desarrolle dos heurísticos para resolver este problema. Además, desarro lle dos cotas que se puedan usar en un algoritmo de ramificación y acotamiento para este problema. Use los heurísticos y las cotas en el siguiente problema.

Tabajo *i*	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
MI	**21 11**	**47**	**2 79**	**79**	**30**	**83**	**96**	**88**
M2		**87**		**74**	**41**	**21**	**29**	**98**

6 PRODUCCIÓN INTERMITENTE

Las plantas de producción continua tienen rutas idénticas para todos los trabajos, de no ser así, se trata de producción intermitente. La producción en muchas plantas fabricantes de metales es intermitente. Existe cierto número de productos que usan las mismas máquinas, pero tal vez en diferente orden. La figura 8-16 muestra tres trabajos procesados en un taller de cuatro máquinas. £1 trabajo 1 consiste en tres operaciones, la primera en la máquina B, la segunda en la A y la última en la C. Estas operaciones deben realizarse en este orden (la operación y precede a la operación *j*+ l)por razones técnicas, como roscar un agujero después de haberlo perforado. El trabajo 2 se procesa en el orden A-B-D y el trabajo 3 sigue la ruta A-C-B-D.

Sin pérdida de generalidad, suponga que cada trabajo se procesa en cada máquina; si no, el tiempo de procesado en esa máquina es cero. Entonces, se tienen *m* máquinas, cada trabajo consiste en *m* operaciones, donde la operación *j* del trabajo *i* tiene tiempo de procesado p_u. Una lista de ruta especifica la máquina que debe procesar cada operación para cada trabajo. Para simplificar los datos de la producción intermitente, se da una tabla de tiempos de procesado para los trabajos y las operaciones. El tiempo de la operación va seguido de una diagonal y la máquina en la que ocurre. Por ejemplo, si la operación 2 del trabajo 6 tiene un elemento 5/C, la segunda operación del trabajo 6 se hace en la máquina C y requiere 5 minutos.

Es difícil programar la producción intermitente. Existen $(n\backslash)^m$ programas posibles para una planta con *n* trabajos y *m* máquinas. Aun para valores pequeños de *n* y m, este número es enorme. Incluso el problema mencionado de tres trabajos y cuatro máquinas tiene más de 1000 programas; un problema de 10 trabajos tendría más de 10^{26}. Se comienza con un caso que se puede resolver, minimizando el lapso en dos máquinas. Se estudiarán dos enfoques heurísticos: los procedimientos de despacho y de búsqueda. Se regresará al problema de programación de la producción intermitente en el capítulo 10, cuando se analicen los heurísticos de cuellos de botella.

6.1 Producción intermitente en dos máquinas

Jackson (1956) amplió el algoritmo de Johnson para minimizar el lapso de producción para la producción continua en dos máquinas. Sean A y B las dos máquinas. El concepto básico es que un taller de producción intermitente con dos máquinas tiene cuatro conjuntos posibles de trabajos: trabajos procesados sólo en A, trabajos procesados sólo en B, trabajos procesados en A y después en B, y trabajos procesados en B y después en A. Denote estos conjuntos por {A}, {B}, {AB} y {BA}, respectivamente. De manera intuitiva, los trabajos en {AB} deben programarse antes en la máquina A que los trabajos en {BA}, porque no se quiere que la máquina A esté ociosa mientras espera que termine la primera operación de un trabajo {BA} en la máquina B antes de poder procesarlo en la máquina A. Por el mismo argumento, se quiere programar, en la máquina A, todos los trabajos {A} antes que los trabajos {BA}. Por otro lado, ningún trabajo {A} debe ir antes que los trabajos {AB} en la máquina A, ya que podría retrasar el proceso de un trabajo {AB} en la máquina B. Esto implica un orden de los conjuntos de trabajos en la máquina A: {AB} {A} {BA}. De la misma manera, el orden en B debe ser {BA} {B} {AB}. Queda por determinar el orden de los trabajos dentro de los conjuntos.

Si sólo se tuvieran trabajos {AB}, se podría usar el algoritmo de Johnson para programarlos. También se podría usar para programar los trabajos en {BA}, pero con la máquina B pri-

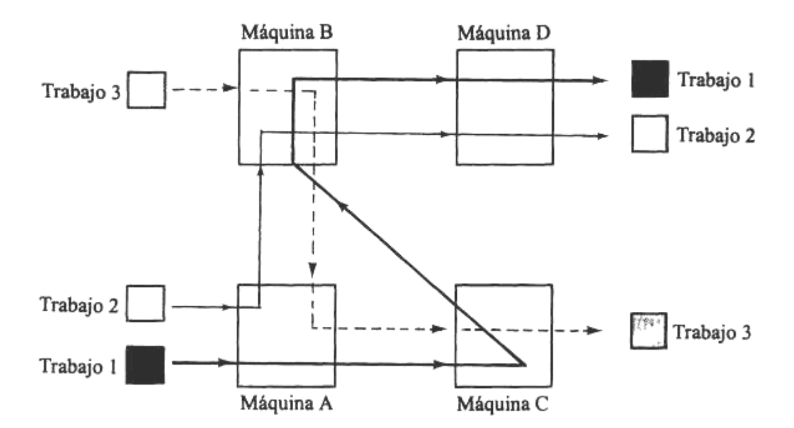


FIGURA 8-16
Taller de producción intermitente

mero y la A después. El orden de los trabajos dentro de {A} y {B} no importa, de manera que el programa de lapso mínimo para un taller de producción intermitente con 2 máquinas es

Máquina A: trabajos {AB} ordenados según el algoritmo de Johnson, después los trabajos {A} en cualquier orden, seguidos de los {BA} en orden inverso al algoritmo de Johnson. Máquina B: trabajos {BA} en orden inverso de Johnson, trabajos {B} en cualquier orden y trabajos {AB} en el orden de Johnson.

Este argumento intuitivo no prueba la optimalidad del procedimiento. El estudiante interesado puede consultar el artículo de Jackson (1956). Se dará un ejemplo ilustrativo.

Ejemplo 8-19. Algoritmo de Jackson. MetalFrame fabrica marcos de metal para puertas. El cabezal es la parte superior del marco. Se requieren dos pasos para preparar el cabezal: ranurado y doblado. Algunos cabezales sólo se ranuran, otros sólo se doblan. Debido a las distintas configuraciones de los cabezales, algunos deben doblarse antes de ranurarse y otros al contrario. Dada la ruta (A representa el doblado y B el ranurado) y los tiempos de procesado de los trabajos a realizar (tabla 8-34), ¿qué programa termina todos los trabajos lo más pronto posible?

TABLA 8-34
Rutas y tiempos de procesado para

Trabajo *i*	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	***6***	**7**	**8**	**9**	**10**
Ruta	BA	AB	BA	B	A	AB	B	BA	BA	AB
Ai	3	1	11	0	3	9	0	8	13	2
Pn	8	10	13	1	0	8	6	10	6	6

Solución. Primero se separan los trabajos en los conjuntos {A} = {5}, {B} = {4,7}, {AB} = {2,6, 10} y {BA} = {1,3,8,9}. Se programa {AB} con el algoritmo de Johnson; los resultados se dan en la tabla 8-35. Los números en negritas en la primera parte de la tabla eligen el menor valor de p_a yp_a. La segunda parte de la tabla contiene la secuencia adecuada. Los tiempos de procesado en negritas en A están en el orden TPC. Sólo hay un número en negritas en B; si hubiera más estaría en el orden TPL.

La tabla 8-36 contiene la misma información para {BA}. Aquí, los tiempos en negritas están en orden no decreciente para B y no creciente para A, ya que la máquina B es en realidad la primera máquina para estos trabajos.

TABLA 8-35
Secuencia para {AB}

Trabajo	2	6	10		2	10	6
p_{i1}	1	9	2	⇒	1	2	9
p_{i2}	10	8	6		10	6	8

TABLA 8-36
Secuencia para {BA}

Trabajo	1	3	8	9		9	3	8	1
p_{i1}	3	11	8	13	⇒	13	11	8	3
p_{i2}	8	13	10	6		6	13	10	8

Los trabajos en A se programan en el orden 2-10-6-5-9-3-8-1, donde el trabajo 2 es el inicial en el tiempo cero y los trabajos 10,6 y 5 comienzan en cuanto termina el trabajo anterior en la máquina A. El trabajo 9 se programa para comenzar en cuanto completa su primera operación en la maquina B, o cuando el trabajo 5 termina en A, lo que ocurra al último. Lo mismo se cumple para los trabajos 3,8 y 1. La secuencia para B es 9-3-8-1-4-7-2-10-6; aquí, los trabajos en {AB} no se pueden programar hasta que termina su primera operación en A, o cuando termina el trabajo que le precede en la secuencia de B. Una gráfica de Gantt del programa completo se puede ver en la figura 8-17. Este programa no tiene tiempo ocioso entre trabajos, y tiene un lapso de 67, determinado por la máquina B.

6.2 Despacho

El enfoque más común para la producción intermitente es usar reglas de despacho con prioridades. La idea básica es programar una operación de un trabajo tan pronto como se pueda; si hay más de un trabajo que espera ser procesado por la misma máquina, se programa el que tiene la mejor prioridad. Es muy fácil construir un programa y una gráfica de Gantt. Defina

A = conjunto de máquinas ociosas
J_k = índice del último trabajo programado en la máquina k U_k = conjunto de trabajos que se pueden procesar en la máquina k H_k = tiempo de terminación del trabajo que se está procesando en la máquina k
u_{it} = urgencia, o prioridad, del trabajo i en el tiempo t

Recuerde que s_u *y c¡j* son los tiempos de inicio y terminación de la operación *j* del trabajo *i*, respectivamente. Por ahora, no se define qué es una prioridad, pero se supone que mientras más pequeña es mejor. Formalmente, el algoritmo se puede establecer de la siguiente manera:

Paso 0. Inicialización: t = 0; H_k = 0, k = 1,2,..., *m; A* = {1,2,...., m}; U_k = {*i* | operación 1 del trabajo *i* está en la máquina *k*, z= 1,2,... ,«};s_{l7} =c_{iy} =0, *i*= 1,2,..., *n; j*= 1,2,..., m. Se va al paso 4.

Paso l. Se incrementa *t* seaí = $win_{k\ =\ lnrUA}H_k$*y K* = {*k* \H_k =*t*}.

Paso 2. Se encuentra el trabajo o trabajos que terminan en el tiempo *t* y las máquinas que quedan libres. Se hace /' = {*i*\J_k = *i* , *k e K*}*y A* = *AuK.*

Paso 3. Se determinan los trabajos listos para programarse en cada máquina; sea U_k = {*i*\ el trabajo *i* usa la máquina *k y* todas las operaciones de *i* antes de *k* están terminadas}, *k=l,2,* …,7W.Si£4 = 0paraA: = 1,2,..., m, se detiene; el programa está completo. Si U_k = 0parato-do *k* G *A*, ninguno de los trabajos que esperan tiene una máquina libre, de manera que no se pueden programar trabajos en este momento. Se va al paso 1.

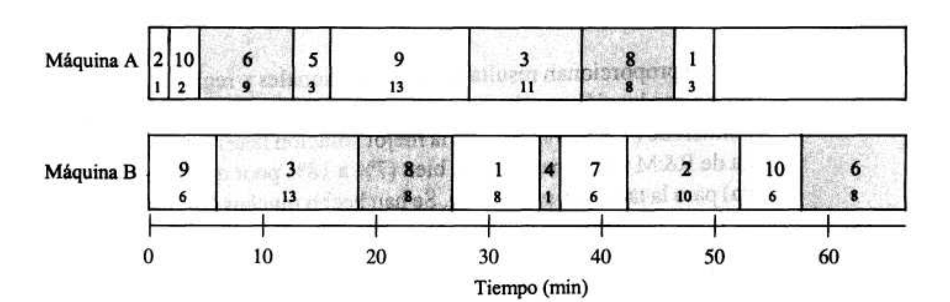


FIGURA 8-17
Programa de lapso de producción mínimo para producción intermitente con dos máquinas

Paso 4. Para cada máquina ociosa, se intenta programar un trabajo; para cada $k \in A$ con $U_k \neq \varnothing$, sea i^* el trabajo con la mejor prioridad, $u_{i^*t} = \text{mín}_{i \in U_k} u_{it}$. Se programa el trabajo i^* en la máquina k; se hace $J_k = i^*, s_{i^*k} = t,\ c_{i^*k} = t + p_{i^*j(k)}, H_k = c_{i^*k}$. Se elimina el tabajo programado de $U_k, U_k \leftarrow U_k - \{i^*\}$y la máquina de $A, A \leftarrow A - \{k\}$. Una vez que se ha examinado toda $k \in A$ con $U_k \neq \varnothing$, se va al paso 1.

Cuando el algoritmo termina, los tiempos de inicio y terminación en cada máquina se pueden usar para construir la gráfica de Gantt.

Existen muchos tipos de prioridades. Algunas medidas de prioridad comunes son

TPC (tiempo de procesado más corto):	Se programa la operación con el tiempo de procesado más corto, $u_{it} = p_{ij}$ (TPPC, $u_{it} = p_{ij} / w_{ij}$, también es posible.
PEPS (primero en entrar, primero en servir):	Se programa la operación que llegó primero.
MTR (mayor trabajo restante):	Se programa la operación del trabajo con la mayor suma de tiempos de procesado entre las operaciones no programadas ($-u_{it} = p_i' = \sum_{k=j,m} p_{ik}$).
FEC (fecha de entrega más cercana):	Se programa la operación cuyo trabajo tiene la fecha de entrega más cercana, $u_{it} = d_i$.
FEC/OP (operación de fecha de entrega más cercana):	Se programa la operación con fecha de entrega más cercana para la operación, $u_{it} = d_i - \sum_{k=j+1,m} p_{ik}$.
HLG (holgura):	Se programa la operación con la menor holgura. La holgura es el tiempo hasta que el trabajo debe entregarse, $u_{it} = d_i - p_i' - t$, donde t es el tiempo actual.
RC (razón crítica):	Se programa la operación con la razón más pequeña de holgura entre tiempo que queda para entregar el trabajo, $u_{it} = (d_i - p_i' - t)/(d_i - t)$.
HLG/OP (operación con holgura):	Se programa la operación con la razón más pequeña de holgura entre el número de operaciones que quedan, $u_{it} = (d_i - p_i' - t)/(m - j + 1)$.
R&M (Rachamadugu y Morton):	Se programa la operación con la razón R&M más pequeña (sección 3-4), usando un promedio de los tiempos en la máquina para esta operación en lugar de todos los tiempos de procesado.

Existen otras prioridades y en la literatura se encuentran algunas pequeñas variaciones en las definiciones. La prioridad usada depende de lo que se quiere de la medida del programa. Por ejemplo, se espera que TPC sea una regla de prioridad razonable para minimizar el tiempo de flujo. De manera similar, FEC sería razonable para la tardanza máxima. Morton y Pentico

(1993) proporcionan resultados computacionales y reglas de despacho complicadas para talleres de producción continua e intermitente. TPPC es una buena medida para el tiempo de flujo ponderado (1 % a 5% peor que la mejor solución heurística encontrada), y una versión ponderada de R&M funciona bastante bien (7% a 18% peor que la mejor solución heurística encontrada) para la tardanza ponderada. Se han hecho muchas comparaciones de reglas de despacho para otras medidas de desempeño publicadas en la literatura; por ejemplo, Philipoom y Fry (1990).

Ejemplo 8-20. Quick Closures: heurístico de despacho para producción intermitente. Un pequeño taller, Quick Closures, fabrica una variedad de abrazaderas industriales metálicas. Tienen cuatro máquinas en el taller: 1) plegadora, 2) realzadora, 3) taladro y 4) fresa. La plegadora dobla y da forma a la abrazadera, la realzadora le imprime un patrón (por ejemplo, una muesca para conectar otro objeto, como una bisagra), el taladro hace una o más perforaciones y la fresa se usa para remover material y dar forma a la parte. Por ahora se tienen órdenes de seis partes que usan todas las máquinas, pero en diferente orden. El tiempo de procesado y la máquina para cada operación de cada trabajo (separados por una /) se dan en la tabla 8-37. Se quiere terminar las seis partes tan pronto como sea posible.

Solución. Éste es un problema clásico de programación de la producción intermitente. Se quiere programar los trabajos para que cada operación se haga en el orden adecuado en la máquina correcta, y que el lapso sea mínimo. Se usa un procedimiento de despacho con MTR como prioridad.

TABLA 8-37
Datos para Quick Closures

	Operación			
Trabajo	**1**	**2**	**3**	**4**
1	6/1	8/2	13/3	5/4
2	4/1	1/2	4/3	3/4
3	3/4	8/2	6/1	4/3
4	5/2	10/1	15/3	4/4
5	3/1	4/2	6/4	4/3
6	4/3	2/1	4/2	5/4

Paso 0. Inicio: $t = 0; H_1 = H_2 = H_3 = H_4 = 0, A = \{1, 2, 3, 4\}; U_1 = \{1, 2, 5\}, U_2 = \{4\}, U_3 = \{6\}$, $U_4 = \{3\}; s_{ij} = c_{ij} = 0, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$; y $j = 1, 2, 3, 4$. Se va al paso 4.

Paso 4. Se intenta programar un trabajo en cada máquina ociosa; para cada $k \in A$ con $U_k \neq \varnothing$, sea i^* el trabajo con la mejor prioridad, $u_{i^*t} = \text{mín}_{i \in U_k} u_{it}$. Para $k = 1$, $u_{i^*0} = \text{mín}_{i \in \{1, 2, 5\}} u_{it}$. La prioridad es MTR, de manera que $u_{10} = -(6 + 8 + 13 + 5) = -32$, $u_{20} = -12$ y $u_{50} = -17$. Así, $u_{i^*0} = \text{mín}\{-32, -12, -17\} = -32$ e $i^* = 1$. Se programa el trabajo 1 en la máquina 1; se hace $J_1 = 1, s_{11} = 0, c_{11} = 0 + 6 = 6, H_1 = 6$. Se elimina el trabajo 1 de U_1, $U_1 = \{2, 5\}$ y la máquina 1 de A, $A = \{2, 3, 4\}$. Ahora se hace $k = 2$; sólo hay un trabajo en U_2, así que se programa en la máquina 2; $i^* = 4, s_{41} = 0, c_{41} = 5, H_2 = 5$, $U_2 = \varnothing$ y $A = \{3, 4\}$. De manera similar, se programan los trabajos 6 y 3 en las máquinas 3 y 4, respectivamente. Los datos se dan en el renglón de $t = 0$ de la tabla 8-38. Observe que para cada U_k el trabajo elegido está en negritas. Además los valores en cursivas de H_k se calcularon en el tiempo que indica el renglón. Se examinó toda $k \in A$ con $U_k \neq \varnothing$, de manera que se va al paso 1.

Paso 1. Se incrementa t; sea $t = \text{mín}_{k=1,m; k \in A} H_k = \text{mín}\{6, 5, 4, 3\} = 3$ y $K = \{k \mid H_k = 3\} = \{4\}$. El valor mínimo de H_k se muestra en negritas en la tabla.

TABLA 8-38
Heurístico de despacho MTR para Quick Closures

t	i^*	K	A	U_1	U_2	U_3	U_4	H_1	H_2	H_3	H_4
0	∅	∅	1, 2, 3, 4	1, 2, 5	4	6	3	6	5	4	3
3	3	4	4	2, 5	3			6	5	4	
4	6	3	3, 4	2, 5, 6	3			6	5		
5	4	2	2, 3, 4	2, 4, 5, 6	3			6	13		
6	1	1	1, 3, 4	2, 4, 5, 6	1			16	13		
13	3	2	2, 3, 4	2, 3, 5, 6	1			16	21		
16	4	1	1, 3, 4	2, 3, 5, 6		4		19	21	31	
19	5	1	1, 4	2, 3, 6	5			23	21	31	
21	1	2	2, 4	3, 6	5	1		23	25	31	
23	2	1	1, 4	3, 6	2	1		25	25	31	
25	6, 5	1, 2	1, 2, 4	3	2, 6	1	5	31	29	31	31
29	6	2	2		2	1	6	31	30	31	31
30	2	2	2			1, 2	6	31		31	31
31	3, 4	1, 3	1, 2, 3			1, 2, 3	4, 6			44	36
36	6	4	1, 2, 4			2, 3, 5	4			44	40
40	4	4	1, 2, 4			2, 3, 5				44	
44	1	3	1, 2, 3, 4			2, 3, 5	1			48	49
48	2	3	1, 2, 3			3, 5	2			52	49
49	1	4	1, 2, 4			5	2			52	52
52	3, 2	3, 4	1, 2, 3, 4			5				56	
56	5	3	1, 2, 3, 4								

Paso 2. Se encuentra el trabajo o trabajos que terminan en el tiempo t y la máquina que queda libre. Sólo el trabajo 3 termina en el tiempo 3, y está en la máquina 4, entonces, $i^3 = \{i \mid J_k = i, k \in K\} = \{3\}, K = \{4\}$ y $A = \varnothing \cup \{4\} = \{4\}$. Estos valores están dados en el renglón $t = 3$ de la tabla 8-38.

Paso 3. Se determinan los trabajos listos para ser programados en cada máquina. El trabajo 3 terminó, así su segunda operación, que es en la máquina 2, está lista para programarse. Ahora $U_1 = \{2, 5\}, U_2 = \{3\}, U_3 = \varnothing$ y $U_4 = \varnothing$. Como no hay trabajos esperando la máquina 4 (que es la única ociosa), no se puede programar un trabajo para que comience en el tiempo 3; por lo tanto se regresa al paso 1.

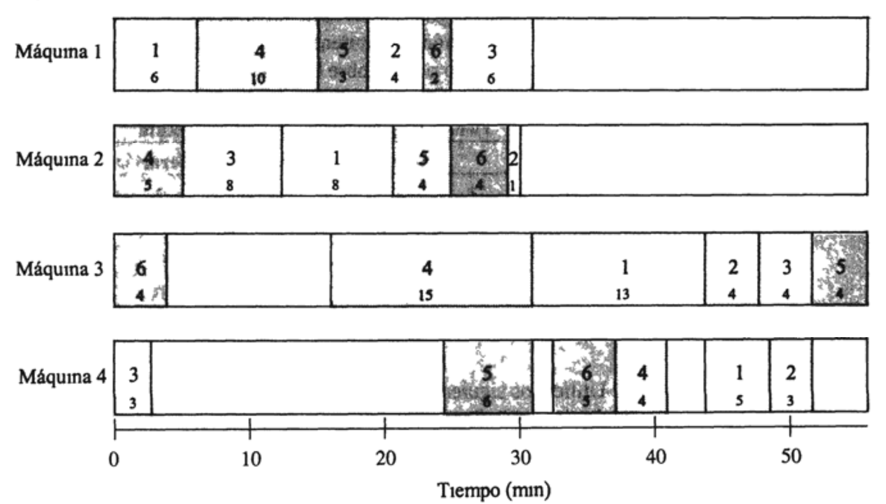


FIGURA 8-18
Programa de despacho con MTR para Quick Closures

El algoritmo continúa, con los resultados dados que se presentan en la tabla 8-38. Si no se programa un trabajo, no se asigna un valor H_k a la máquina ociosa. El valor H_k se repite en cada renglón hasta que k está ociosa o se programa otro trabajo en ella. Cuando t = 5, se programa el trabajo 3 en la máquina 2. Cuando t = 6 se usa de nuevo MTR para elegir un trabajo de í/,; éste es el trabajo 4, que está en negritas en la tabla. En /=23, se tienen dos máquinas, 1 y 2, empatadas con el mínimo H_k, entonces, cuando se avanza t, hay dos trabajos listos para programarse en alguna máquina. También se pueden programar dos trabajos en espera en t = 25. En este caso, se programa el trabajo 3 en la máquina 1 y el trabajo 6 en la máquina 2. Cuando t=48, se tiene un empate entre los trabajos 3 y 5 en el MTR: se elige el trabajo 3 de manera arbitraria. En t = 56, el trabajo 5 termina en la máquina 3, y todos los trabajos quedan completos. El lapso para el programa generado por el heurístico de despacho MTR es 56, y se muestra en la figura 8-18.

Otras prioridades generarán un programa diferente; por ejemplo, la regla del menor trabajo restante da un lapso de 66.

Se pueden usar otros métodos para programar la producción intermitente. Van Laarhoven *et al.* (1992) usa un algoritmo de simulación de recocido para la producción intermitente. En el capítulo 10 se estudiarán los heurísticos de cuellos de botella, que son muy útiles en este tipo de producción. Ahora se examinará la capacidad finita de los sistemas de programación.

SECCIÓN 6 EJERCICIOS

8.56. Determine el programa de lapso óptimo para los siguientes datos de producción intermitente con dos máquinas.

Trabajo *i*	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
a_i	**10**	**2**	**4**	**8**	**5**	**12**	**7**	**—**	**14**
	2	**4**	**5**	**8**	**6**	**9**	**—**	**15**	**—**
Primera máquina	**A**	**A**	**B**	**A**	**B**	**B**	**A**	**B**	**A**

8.57. Desarrolle un programa que recomendaría para minimizar el lapso de producción para el siguiente taller de producción intermitente, con tres máquinas y cuatro trabajos. Haga un comentario tan convencido como pueda sobre la bondad del programa.

	Tiempo de procesado			**Ruta**		
	Operación			**Operación**		
Trabajo	**1**	**2**	**3**	**1**	**2**	**3**
1	**5**	**10**	**12**	**A**	**B**	**C**
2	**4**	**3**	**8**	**A**	**C**	**B**
3	**9**	**6**	**7**	**C**	**B**	**A**
4	**7**	**5**	**11**	**B**	**C**	**A**

8.58. Utilice los siguientes datos para dibujar una gráfica de Gantt para el programa que recomendaría de cinco trabajos a través de las operaciones de taladro (T), torno (R), molino (M) y fresa (F), si se quiere minimizar el lapso de producción. Analice su método de solución y la optimalidad del programa.

Trabajo 1		Trabajo 2		Trabajo 3		Trabajo 4		Trabajo 5	
Op.	**Tiempo**	**Op.**	**Tiempo**	**Op.**	**Tiempo**	**Op.**	**Tiempo**	**Op.**	**Tiempo**
T	1	R	2	M	2	T	1	F	2
R	2	F	2	T	2	M	2	T	2
F	2	T	2	M	1			M	1
				R	1				

7 SISTEMAS DE PROGRAMACIÓN CON CAPACIDAD FINITA

Los modelos de programación estudiados en este capítulo son una parte integral de un sistema de programación de capacidad finita. Estos sistemas estrechan la relación entre los planes de capacidad de MRP y los programas detallados para la planta. Como muy pocos sistemas MRP toman en cuenta la preparación y la mayoría supone tiempos de entrega constantes, sus metas de producción pueden ser poco realistas. La manufactura moderna requiere diversidad en los productos, producción en lotes pequeños, entrega rápida y cumplimiento de las fechas de entrega prometidas. Más aún, es necesario tener flexibilidad para responder a los cambios en las órdenes de los clientes y disponibilidad de materiales o de capacidad. Por tradición, los inventarios y el exceso de capacidad han ocultado problemas asociados con estos requerimientos. La disminución de los niveles de inventario y capacidad han hecho que la programación de la capacidad finita sea una paso importante en la planeación y control de la producción.

Existe una relación fundamental entre la capacidad y el tiempo de entrega. En muchas plantas tradicionales, los estudios muestran que alrededor del 5% del tiempo de entrega de la manufactura de un trabajo es un proceso con valor agregado real. El resto es tiempo de espera y de movimiento. El tiempo de espera puede ser consecuencia de otros trabajos en proceso, de la falta de materiales o herramientas o de la preparación. Tener un exceso en la capacidad es una manera de aliviar el problema. Si se tienen máquinas dedicadas para cada trabajo, entonces no es necesario esperar que otros trabajos sean procesados, ni que se lleve a cabo la preparación. Por otro lado, el inventario puede permitir un abastecimiento instantáneo y disminuir el número de preparaciones necesarias; separa las operaciones sucesivas y se puede planear y programar a nivel local, que es mucho más sencillo. Desafortunadamente, esto requiere una alta inversión en capacidad e inventario.

Un enfoque es simplificar el sistema de producción. La fabricación en células convierte a los talleres de producción intermitente en talleres dedicados de producción continua para cada producto. La reducción de preparaciones puede eliminar el tiempo perdido por el cambio de un trabajo a otro. Aunque estos conceptos son racionales, existen situaciones en las que el costo de la capacidad prohibe dedicar equipo, o para las que ya no es posible reducir más las preparaciones. En tales casos, una programación adecuada puede ayudar a reducir el tiempo de entrega y, en consecuencia, se podrá cumplir mejor con las fechas prometidas y se podrá crear capacidad al dedicar menos tiempo a las preparaciones o las esperas por material. La programación puede también suavizar el flujo del producto. La programación asistida por computadora libera a los gerentes para que se dediquen a aspectos más importantes en lugar de generar los programas.

Muchas compañías tienen un manual del programador o un comité que crea los programas El programa que resulta determina el orden de distribución de las órdenes y se usa para el control de la planta. Con frecuencia, el cambio requiere colocar algunos trabajos en una lista espe-

cial que especifica aquellos que son importantes, cuáles tienen prioridad sobre otros. Algunas personas se dedican a acelerar los trabajos en esta lista especial; el personal de ventas, los representantes del servicio a clientes y los gerentes de producción pueden también hacerlo. Estas prácticas pueden hacer más daño que bien.

Los sistemas de programación de capacidad finita asistidos por computadora vencen muchos de estos problemas. Se usan insumos de bases de datos existentes para generar uno o más programas a partir de un modelo apropiado, por ejemplo, un modelo de programación de un cuello de botella. Un programador revisa el programa y lo acepta como está o lo modifica. Se puede modificar en forma manual o puede cambiar las prioridades, los tiempos o las capacidades y dejar que la computadora genere un nuevo programa. El programa se implanta y se da seguimiento a los trabajos en la planta. Si ocurren cambios en la producción, el programa se modifica para tomarlos en cuenta. En la sección de software (sección 8) se estudiarán varios detalles de este proceso.

Algunos beneficios de un sistema de programación de la capacidad finita son

Mayor número de entregas a tiempo
Tiempos de entrega reducidos
- Incremento de la capacidad
- Producción más suave
- Más tiempo del administrador dedicado a problemas importantes

Un sistema de programación de la planta en una compañía incrementó el ingreso en $844 000; otra compañía redujo sus faltantes de 60% a 13%; una tercera disminuyó 70% su trabajo en proceso; una cuarta firma recuperó el costo del sistema en 21 días, y otras han reducido sus entregas tarde de manera significativa. Aunque no es sencillo desarrollar estos sistemas, las ganancias valen la pena el esfuerzo. El cuadro 8-2 analiza la implantación de un sistema en Eaton Corporation.

CUADRO 8-2

LA PROGRAMACIÓN FINITA AYUDA A EATON A DISMINUIR PREPARACIONES Y AUMENTAR LA PRODUCCIÓN DE LÍNEA

El cambio de la operación por lotes ajusto a tiempo (JIT) afecta algo más que el inventario y la distribución de las máquinas-herramienta. En Eaton Corporation Truck Components Opera-tions North America (TCONA), en Shelbyville, Tenn., el departamento de supervisores necesitaba una herramienta para eliminar las listas especiales resultado de tiempos de entrega más cortos a los clientes y para ayudarlos a cumplir con metas móviles.

Esa herramienta es el sistema FACTOR de administración de la capacidad finita de Pritsker Corporation, Indianápolis, Indiana. "El sistema ayuda a reconocer el plan alrededor de los cuellos de botella surgidos a partir de un programa de producción con cambios drásticos todos los días", explica Bill Dixon, el gerente de planta en Eaton Shelbyville.

Los programas que proporciona el sistema están controlados por los requerimientos de las órdenes de los clientes generados por el sistema de planeación de los recursos de manufactura (MRPII) de TCONA. El sistema MRPII programa el material que entra en las plantas de manufactura, después programa el material en su paso por la planta.

Los resultados incluyen menos preparaciones y costos fijos, mayor utilización bruta, órdenes terminadas a tiempo y la eliminación de las listas especiales.

CUADRO 8-2
(continuación)

LOGRO DE INCREMENTO EN LA PRODUCCIÓN

TCONA fabrica componentes y ensambles para transmisiones, ejes y frenos para la industria mundial de camiones de trabajo mediano y pesado, en particular para fabricantes de equipo original (OEM) y para el mercado de partes. Con sede en Galesburg» MI, TCONA comprende siete plantas de manufactura, varios almacenes de venta de componentes que apoyan flotas de distribuidores, varias fábricas regionales y dos instalaciones de corte y secuenciación.

La planta de Shelbyville fabrica partes que van de tolvas metálicas a cajas de transmisión completas. La planta tiene más de 700 máquinas herramienta asignadas a cinco departamentos, que incluyen ejes, engranes, acero gris y frenos. En cualquier momento están en programación alrededor de 75 números de partes dentro de cada departamento; entre 600 y 800 números activos de partes están en producción en cualquier mes.

La misión de la división, según Bob DiRaimo, gerente de tecnologías de la información, es ser "el líder de clase mundial en nuestros segmentos de mercado de componentes para camiones, medido por el nivel más alto de satisfacción del cliente". La misión de TCONA es cumplir continuamente con las necesidades de sus clientes con lamas alta calidad, los productos más competitivos en el mundo y con un diseño, manufactura y apoyo organizacional de clase mundial.

Con esta meta en mente, hace diez años, Shelbyville cambió su operación por lotes, en donde las partes se trasladaban en horquillas elevadoras entre las áreas de la planta, a áreas de maquinado celulares dispuestas en líneas de flujo de producción.

Como resultado la producción de partes tuvo un incremento drástico, pero lo mismo ocurrió con la complejidad de la programación de la producción.

Entonces, la programación por departamentos, incluyendo prioridades de las partes y asignación de máquinas, se hacía en el departamento del supervisor de planta y era subjetiva "Hace años, cuando teníamos 3 meses para entregar, era fácil manejar una operación por lotes en toda la fábrica", explica Dixqn, "pero con los cambios en el mercado de la última década, cambió la ñlosoña de Eaton. Comenzamos a operar con JIT —reduciendo el inventario cuando el cliente estaba cerca y dando a nuestros clientes lo que querían, cuando lo querían y con tiempos de entrega más cortos—. Estábamos por llegar al punto en el que cuando un cliente llamaba, podíamos responder. Pero para hacer eso, teníamos que manejar miles de pequeñas órdenes a través de la fábrica".

Cumplir con el incremento en las órdenes de los clientes con tiempos de entrega menores cobraba su cuota en la planta. El departamento de ejes, por ejemplo, dependía demasiado de las listas especiales —todo era prioritario—. Los operarios se encontraban quitando y preparando nuevos trabajos de lotes muy pequeños, tal vez de 10 a 15 piezas, varias veces al día.

"En algunas áreas donde desarrollamos células de maquinado o compramos modernas máquinas de control numérico computarizado (CNC), teníamos la capacidad de cambios rápidos. Pero era imposible tener ese tipo de producción en todas las áreas de una planta de 25 años como Shelbyville", continúa Dixon.

Ayudaba un poco el sistema MRPII para computadora grande de TCONA, que consistía en la planeación de requerimientos de materiales (MRP), control de inventarios y módulos de contabilidad. El sistema MRP II proporcionaba parte de la programación en la planta. "Todos los programas se creaban en Galesburg", explica Rob Conway, gerente de materiales de TCONA, "nos mandaban los números de partes y las cantidades que había que fabricar y nosotros programábamos eso manualmente por departamento para toda la planta".

Shelbyville se dio cuenta pronto que necesitaba una mejor herramienta para programar la operación de la planta. "Queríamos más detalles que ayudaran al supervisor a establecer prioridades de las partes, agruparlas y reducir las preparaciones", sigue diciendo Conway.

CUADRO 8-2
(continuación)

Esa herramienta era el sistema de administración de la capacidad finita FACTOR de Pritsker. La gente de TCONA vio por primera vez una demostración del sistema en una feria comercial en 1989. Poco después, la planta de ejes y frenos comenzó a usar el sistema. Shelbyville comenzó a trabajar con él y, en febrero de 1992, el departamento de engranes lo adoptó también.

"Es la herramienta que usamos para compaginar las necesidades de los clientes con la capacidad de nuestra fábrica y obtener la producción que realmente podemos", dice Dixon.

INSTALACIÓN DEL SISTEMA

Para la instalación, debía introducirse información que reflejara la capacidad de producción de la planta y los requerimientos de las órdenes. Esta información incluía programas de turnos, tiempos de operación para cada turno, requerimientos de recursos (datos operacionales de las máquinas), una lista de todas las partes, los planos de proceso para las partes individuales, el calendario de la planta (incluyendo programa de vacaciones y paros programados por inventario), matrices de preparación y datos de las órdenes.

Con esta información, el sistema ahora sabe justo lo que se necesita para producir una parte específica en la planta.

También se introdujeron al sistema las reglas de prioridad para programar la producción, el sistema incluía cerca de 18 reglas. Shelbyville decidió usar dos de ellas y hacer que Pritsker programara una tercera combinada con esas dos. Con una de las reglas de prioridad estándar, la fecha de entrega más cercana, el sistema de programación finita genera un programa de producción basado estrictamente en esa fecha de entrega más cercana de las órdenes de los clientes, sin importar el número de preparaciones requeridas. Con la segunda regla estándar, minimizar las preparaciones, el sistema genera un programa de producción basado sólo en ella, sin importar las fechas de entrega.

La tercera regla de prioridad de Shelbyville, la regla combinada, divide una ventana de programación de 30 días en tres categorías: "especial", "normal" y "lenta". El sistema analiza las fechas de entrega de las órdenes de los clientes y coloca las que deben entregarse antes de 10 días en la categoría de "especial"; las que se entregan entre 10 y 20 días en la categoría de "normal", y las que son para más de 20 días en la categoría de "lenta".

Después el sistema programa las órdenes especiales según la fecha de entrega más cercana; para las órdenes normales minimiza el número de preparaciones, a menos que cause que la parte pase a la categoría de especial, en cuyo caso se programa según la fecha más cercana; por último, programa las órdenes lentas basándose sólo en el número de preparaciones.

Estas reglas de programación proporcionan lo mejor de todos los mundos: fechas de entrega más cercanas, número de preparaciones mínimo y la combinación de las dos.

En la operación, el sistema MRPII de TCONA genera un programa de ensamble y construcción planeados para las órdenes internas. La información asociada con aquellas órdenes en la ventana de 30 días se baja al sistema cada semana. Esta información incluye los números de partes en cada orden de los clientes, las cantidades y las fechas de entrega.

"Después dejamos que el sistema de programación finita trabaje", explica Di Raimo, "según el conjunto de reglas de optimización que hemos establecido en el sistema, dejamos que nos diga qué partes fabricar, cuántas y cuándo.

Eaton corre tres simulaciones del programa y las compara. Los programas se comparan respecto al número total de horas que se retrasan las órdenes de los clientes, el número de preparaciones, el tiempo total de preparación y el tiempo total de producción. Toman el mejor programa, imprimen el informe y lo mandan al supervisor de planta, que es quien usa el programa generado por el sistema.

CUADRO 8-2
(continuación)

"Cinco minutos después de obtener una copia de los programas, sé cuál es el desempeño del área de manufactura", dice Dixon, "antes, no sabía cómo iba el flujo de partes a menos que fuera a la planta y hablara con cada supervisor de departamento".

REDUCCIONES DE COSTO REALES

El departamento de ejes de Shelbyville comenzó a trabajar bajo el sistema de programación de la capacidad finita después de casi siete meses de trabajo de instalación, que incluía captura de datos, introducción y rediseño de prioridades, informes al gusto, integración del sistema con el MRPII y una semana de capacitación. El departamento de engranes de la planta estrenó el sistema en julio de 1992 después de sólo tres meses de trabajo de captura de datos. Ahora se generan programas de producción para ambos departamentos dos veces a la semana.

Después de seis meses de usar el sistema, el departamento de ejes de Shelbyville ha obtenido resultados sorprendentes: reducción de 27% en el número de preparaciones, reducción de 12% en los costos de preparación como porcentaje de la mano de obra directa e incremento de 29% en la utilización bruta —producción—. Con la misma importancia, las listas especiales pertenecen al pasado; las órdenes se terminan a tiempo. El sistema ayuda también a que los supervisores prevean las necesidades de mano de obra y tiempo extra. El departamento de engranes de Shelbyville también ha obtenido beneficios: las órdenes retrasadas se han reducido a la mitad y el retraso de esas órdenes se redujo considerablemente. "Estamos hablando de miles de dólares al mes", dice Dixon, "y están los costos de cumplir con los programas de los clientes, que se traduce en más ventas y en reducción del tiempo extra—todas esas cosas que todavía no evaluamos en términos de ahorros reales—".

"Este sistema nos ha ayudado a alcanzar la filosofía de Eaton de usar JIT para satisfacer a nuestros clientes", explica DiRaimo, "nos permite programar mejor la capacidad de manufactura en las instalaciones y optimizar ese programa de acuerdo con las filosofías de la administración local".

"Además, conforme se desarrollen los conceptos de equipos de trabajo, líneas de producción y centros de maquinado en Shelbyville, durante los próximos 12 a 18 meses, el sistema nos permitirá delegar la responsabilidad de programación por departamento a los empleados", dice Rob Conway, "ahora los supervisores de los departamentos podrán ser más administradores que programadores, y podrán dedicarse a facilitar el trabajo, resolver problemas de cuellos de botella y concentrarse en problemas reales en sus respectivos departamentos".

8 SOFTWARE

Se dispone de paquetes para programación de la producción en abundancia. Esos paquetes van desde software para PC de dominio público hasta aplicaciones hechas a la medida que cuestan millones de dólares. Debe tenerse cuidado al comprar un paquete, ya que las habilidades varían mucho. Voet y Dewilde (1994) dan algunas sugerencias para elegir un paquete de programación de producción. Buyer's Guide (1995) contiene información sobre más de 70 paquetes. Se puede encontrar un estudio profundo de varios de ellos en Pinedo (1995).

Las funciones básicas que puede realizar un paquete de programación de producción son:

Exhibición del programa
Evaluación del programa

- Ajustes al programa
- Generación de la programación
  Simulación de la programación

Los paquetes pueden tener una o más de estas características. Se hará una presentación breve de cada una.

La exhibición del programa es una descripción de un programa dado. Esto se puede hacer mediante una simple lista con tiempos de inicio y terminación de cada trabajo y la combinación de las máquinas. Con más frecuencia se presenta una gráfica de Gantt. Las gráficas de Gantt van de barras de caracteres ASCII a gráficas de alta resolución en colores. Es importante que el usuario entienda bien el programa y saber de dónde viene el programa exhibido. El software menos costoso requiere que el usuario genere el programa; los de mayor precio contienen generadores del programa.

Algunos paquetes hacen la evaluación del programa. Esto proporciona medidas de la "bondad" del programa, que pueden incluir el lapso de producción, el tiempo de flujo y la tardanza, lo mismo que el uso de recursos, personal y niveles de trabajo en proceso y alguna otra información relevante. Igual que con la exhibición, esta información se puede mostrar en gráficas o en una lista.

Algunos paquetes de software proporcionan al usuario la posibilidad de cambiar o ajustar los programas. Los más elaborados permiten "tomar e insertar" operaciones en la misma gráfica de Gantt; éstos requieren interfaces de usuario gráficas complejas. Los paquetes menos costosos permiten hacer cambios en los tiempos de inicio y terminación de los trabajos. De la mano con la evaluación del programa, los ajustes permiten al usuario hacer un análisis sencillo de "qué pasa si".

Para exhibir, evaluar o ajustar un programa, primero debe generarse. Ésta es la parte crítica de la programación de la capacidad finita. Muchos paquetes dejan la generación del programa al usuario y nada más la exhiben o la evalúan. Cuando es difícil obtener un buen programa a mano, lo que con frecuencia ocurre, estos paquetes no son muy útiles. Los paquetes más avanzados generan los programas, pero muchos de ellos no son muy buenos. El paquete puede generar un solo programa, varios programas o el mejor de un "subconjunto" de programas. Las reglas de despacho simples, como "primero en entrar, primero en servir" o TPC pueden producir un programa. Al usar varias reglas de despacho se pueden generar varios programas; después el usuario elige uno o el paquete sólo le muestra el "mejor". Se pueden usar heurísticos más avanzados, incluso procedimientos de ramificación y acotamiento, para generar un programa. Como la programación es difícil, el enfoque debe hacerse a la medida del problema que se tiene; un enfoque complejo equivocado puede ser peor que las reglas de despacho sencillas.

Si el sistema de producción es complicado (como una planta grande de producción intermitente), puede ser necesaria una simulación del programa. Al someter a prueba el programa con simulación se pueden examinar muchos factores no considerados en las decisiones de programación. Esto puede ser en extremo útil, en particular si el heurístico usa tiempos de entrega, que la simulación puede estimar mejor. Los paquetes que simulan la planta son costosos, por lo general, superan los 30 000 dólares.

En la experiencia de los autores, muy pocas compañías obtienen buenos resultados con paquetes baratos o con software comercial. Debido a las variaciones en los entornos de programación, con frecuencia se requiere software hecho a la medida. Esto casi siempre incluye la compra de un paquete y algunas consultas con quien lo desarrolla, lo cual puede resultar costoso.

Existen paquetes "educativos" de programación. Morton y Pentico (1993) ofrecen el software, Parsifal, con su libro. Parsifal resuelve la mayor parte de los modelos de programación; puede usar varios heurísticos para modelos de una sola máquina, máquinas paralelas, producción continua y producción intermitente. Dispone de varios algoritmos generales, incluyendo simulación de recocido. Su desempeño es bastante bueno para muchos problemas pequeños, y es posible que pueda incorporarse a un sistema de programación. QS: Quantitative Systems (Chang, 1995) es un software general que realiza programación de producción continua e intermitente. Se pueden usar muchos de los heurísticos para producción continua y la mayoría de las reglas de despacho se encuentran disponibles.

9 EVOLUCIÓN

Siempre se ha hecho programación de la producción; sin duda, la construcción de las pirámides la requirió. Gantt (1911) fue, tal vez, el primero en impulsar el enfoque cuantitativo para la programación. Como área de atención, la programación en realidad tuvo su inicio a mediados de los 50. Johnson (1954), Smith (1956), Jackson (1956) y McNaughton (1959) desarrollaron los modelos y las soluciones clásicos. Estas publicaciones dieron fundamento al trabajo que siguió. Los primeros resultados fueron consolidados por Muth y Thompson (1963). Se modelaron muchos problemas de programación complicados como problemas de programación entera mixta, pero su naturaleza combinatoria los hizo imposibles de resolver en un tiempo razonable. Esto hizo que el esfuerzo se tornara a los algoritmos heurísticos. Conway *et al* (1967) escribieron el primer libro de texto sobre programación de la producción Una generación de investigadores y profesionales aprendió programación en el riguroso pero comprensible libro de Baker (1974).

Los años 70 produjeron más resultados teóricos. El trabajo pionero sobre análisis de heurísticos para el peor caso (Graham, 1969) y la complejidad de varios modelos de programación de la producción (Karp, 1972) condujeron a resultados importantes. Rinnooy Kan (1976) popularizó estos enfoques.

La investigación actual sobre programación parece estar dedicada a resultados más prácticos. Panwalker *et al* (1973) y McKay *et al* (1988) investigaron la programación de la producción en la industria e identificaron aspectos relevantes. La reorganización de los sistemas de manufactura, en particular el movimiento para reducir inventario y la necesidad de reducir tiempos de entrega ha hecho que la programación sea mucho más importante. Los estimulantes, aunque controvertidos, resultados de los sistemas OPT (vea el capítulo 10) despertaron el interés de muchos profesionales e investigadores; esto llevó a fijar la atención en la programación de cuellos de botella. Las técnicas de solución generales, como simulación de recocido y algoritmos genéticos han permitido que algunos modelos más complejos se puedan resolver. El trabajo actual sobre análisis estocástico y programación con criterios múltiples sustenta una promesa para el futuro. Un buen punto de partida es el libro de Pinedo (1995), que combina resultados teóricos con el estudio de casos.

Las computadoras actuales más rápidas, al alcance de todos, y las interfases gráficas amigables han hecho que sea más sencillo implantar una programación de la producción. *APICS: The Performance Advantage,* una revista orientada a los profesionales en la práctica, ha cambiado su evaluación del software, de los paquetes de MRPII a los paquetes de programación de

capacidad finita. Se han publicado varios artículos (por ejemplo, Heuttel, 1993 y Gilman, 1994) sobre el creciente interés en la programación de la producción/capacidad. Conforme ocurren los avances metodológicos, se hace borrosa la distinción entre planeación y programación (Lasserre, 1992), y una compañía que no pueda programar rápida y correctamente estará en una tremenda desventaja.

10 RESUMEN

Este capítulo examinó las operaciones de programación. La programación se ha convertido en un aspecto crítico en el entorno actual de bajo inventario y tiempos de entrega cortos. Los sistemas tradicionales de MRP y MRPII no hacen hincapié en la programación real de la capacidad finita.

El capítulo comienza con la definición básica de problemas de programación. Se presentan trabajos, máquinas, medidas y gráficas de Gantt. Se estudian modelos de uña sola máquina para diferentes medidas. Muchos de ellos se resuelven con facilidad, pero no es probable que existan algoritmos eficientes para los modelos que incluyen tiempos de preparación o tardanza. Por último, se analizaron los métodos de búsqueda que se pueden modificar para resolver la mayor parte de los modelos de programación.

Después se cubren los modelos de programación paralela. Se tienen máquinas múltiples que procesan por completo cualquier trabajo. Para máquinas idénticas, los problemas de tiempo de flujo tienen una solución sencilla. Para otras medidas, las listas heurísticas son un buen enfoque. Se estudió la cota del peor caso para el modelo del lapso de producción.

Las plantas de producción continua tienen múltiples operaciones para cada trabajo, las cuales se realizan en el mismo orden. Sólo se pueden resolver con facilidad los problemas de dos máquinas y algunos del lapso en tres máquinas. Otros modelos requieren soluciones heurísticas. Se presentan varios heurísticos, junto con las cotas que se pueden usar en el algoritmo de ramificación y acotamiento. Los métodos de búsqueda también son útiles para encontrar buenos programas de permutación para producción continua.

Los talleres de producción intermitente, los modelos de programación más difíciles, se analizaron a continuación. Se presentaron heurísticos de despacho y varias reglas de prioridad.

Hoy en día se dispone de software para programación de la producción. La regla "lo barato cuesta caro" se aplica a su compra; los sistemas costosos pueden resultar más útiles. Por último, se habló sobre la evolución de la programación de la producción. A partir de su inicio gráfico, se ha desarrollado una base teórica para la programación. Las nuevas filosofías de producción han hecho que la programación tenga la más alta prioridad en los sistemas de manufactura actuales.

MINICASO: ILANA DESIGNS

llana Designs, con sede en Rotterdam, fabrica prendas de vestir variadas y de alta calidad. llana Bloem inició la compañía en 1954 y rápidamente cobró fuerza en el Mercado Común. Las camisas de vestir para caballero constituyen una línea de producto importante. En la actualidad,

la planta de camisas de Dresden tienen un atraso de varias semanas en sus entregas, y esto hace que Joakim Valsta, el jefe de mercadotecnia, esté preocupado porque los clientes actuales compren a otro fabricante.

La planta de Dresden produce camisas hechas a la medida. Una orden consiste en cantidades de diferentes tipos (tela, color y estilo) de camisas. Cada tipo se convierte en un trabajo. Se pueden combinar trabajos de diferentes órdenes que contengan el mismo tipo de camisa, o un mismo tipo de camisas se puede dividir en más de un trabajo. Esto último ocurre cuando hay más camisas en un trabajo de las que se pueden cortar al mismo tiempo en la mesa de corte. Una vez que se define un trabajo, sigue la secuencia de operaciones que transforma la tela en camisas empacadas. Todos los trabajos siguen las operaciones en el mismo orden: extender, marcar, cortar, ajustar, coser, colocar botones y empacar.

Se tienen muchas células para hacer camisas, todas siguen el proceso descrito. Se analizará cada operación.

Extender. Se traen tantos de la tela apropiada para el trabajo a las mesas de corte y se extienden. Se pueden extender una, dos o más capas de tela sobre la mesa.

Marcar. Se "marca" un patrón sobre la tela extendida, casi siempre con una máquina NC, aunque en ocasiones se hace con un patrón de papel. Un patrón de corte puede incluir varias camisas, de la misma o de diferentes tallas. Todas las partes de una camisa se deben cortar de la misma capa de tela.

Corte. Se corta la tela siguiendo la forma del patrón con un cuchillo láser. En realidad, este corte saca muchas camisas, por lo común hay muchas capas de tela sobre la mesa y cada capa contiene varias camisas. Cuando termina el corte, la mesa se traslada al ajuste.

Ajuste. Aquí se atan todas las componentes de cada camisa. Todos los atados se mandan a costura.

Coser. Costureras(os) competentes unen las componentes para hacer una camisa casi terminada. Se cuenta con 20 máquinas de coser y 20 operadores en el salón de costura. Cuando todas las camisas están cosidas se van al colocado de botones.

Colocar botones. Aquí se cosen los botones a la camisa. Esto se hace con un máquina especial llamada "botonadura". También hace el ojal. Una vez que los botones están colocados, la camisa se pone en un contenedor. Cuando termina un trabajo, el contenedor se lleva a empaque.

Empacar. Las camisas se doblan cubriendo un cartón, se ponen alfileres, se empacan en plástico transparente y se apilan en bandejas. Cuando todas las camisas están empacadas, se mandan a envíos, en donde se combinan las órdenes y se mandan a los clientes.

Teodor Boctor, el gerente de planta, piensa que existen varias soluciones a largo plazo para el problema, todas ellas incluyen nueva tecnología para aumentar la capacidad. Lise Madsen, vicepresidenta de manufactura, piensa que la nueva tecnología y algunos cambios en los procedimientos pueden ayudar a la larga, pero quiere hacer algo ahora. El superintendente de una célula, Amar Crainic, considera que se pierde mucho tiempo de célula entre los trabajos. Sin embargo, no ha tenido tiempo de verificarlo ni de idear mejores programas para su célula.

Lise lo contrata a usted como consultor para hacer un estudio preliminar sobre la situación. Amar le proporciona los datos de su célula en la siguiente tabla:

	Tiempos de operación (minutos)						
Trabajo	Extender	Marcar	Cortar	Ajustar	Coser	Botones	Empaque
1	8	1	7	45	7	41	8
2	6	1	8	25	13	27	12
3	8	1	5	36	7	31	10
4	4	2	10	49	6	37	9
5	9	1	5	33	13	27	13
6	7	2	7	25	11	36	11
7	4	1	8	36	15	29	11
8	12	2	9	25	9	22	8
9	13	2	11	32	13	25	12
10	5	2	10	48	7	34	9
11	10	2	10	28	6	37	8
12	12	2	5	27	12	22	8
13	9	2	8	30	10	35	13
14	6	1	11	46	16	28	13
15	15	1	9	34	8	37	8

Proporcione el programa que recomienda a partir de los datos. Analice la medida de bondad del programa. ¿Qué propondría que se hiciera como un estudio completo? ¿Qué datos adicionales serían necesarios? Enumere todas las suposiciones que haga.

11 REFERENCIAS

Arkin, E. M. y Roundy, R. O., "Weighted-Tardiness Scheduling on Parallel Machines with Proportional Weights", *Operations Research,* 39,64-81,1991.

Baker, K. R., *Introduction to Sequencing and Scheduling,* John Wiley & Sons, Nueva York, 1974.

Baker, K. R., *Elements of Sequencing and Scheduling,* Baker Press, Hanover, NH, 1995. Buyer's Guide, "Scheduling Software", *HE Solutions,* septiembre, 1995, pp. 46-53. Cambell, H. G., Dudek, R. A. y Smith, M. L., "A Heuristic Algorithm for the n Job, m Machine Sequencing Problem", *Management Science,* 16, B630-B637,1970.

Chang, Y.L., *QS: Quantitative Systems Versión 3.0,* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995. Cheng, T. C. E. y Chen, Z-L., "Parallel-Machine Scheduling Problems with Earliness and Tardiness Penalties", *Journal ofthe Operational Research Society,* 45,685-695,1994. Cheng, T. C. E. y Sin, C. C. S., "A State-of-the-Art Review of Parallel-Machine Scheduling Research", *European Journal of Operational Research,* 47,271-292,1990. Collins, N. E., Eglese, R. W. y Golden, B. L, "Simulated Annealing—An Annotated Bibliography", *American Journal of Mathematical and Management Science,* 8, 209-307, 1988. Conway, R. W., Maxwell, W. L. y Miller, L. W., *Theory of Scheduling,* Addison-Wesley, Reading, MA, 1967. Credle, R., "Finite Scheduling Helps Eaton Cut Line Setups and Increase Line Throughput", *Case History: Scheduling, APICS—The Performance Advantage,* enero, 1993, pp. 30-32. Emmons, H., "One-Machine Sequencing to Minimize Certain Functions of Job Tardiness", *Operations* tferearc/r, 17,701-715,1969.

French, S., *Sequencing and Scheduling,* John Wiley & Sons, Nueva York, 1986. Gantt, H. L., ed., *How Sdentific Management Is Applied,* Hive Publishing Company, Easton, P A, 1911.

Garey, M. R. y Johnson, D. S., *Computen and Intractability,* Freeman, San Francisco, 1979. Gilman, A., "Interest in Finite Scheduling Is Growing... Why?" *APICS: The Performance Advantage,*
agosto, 1994, pp. 45-48. Grabowski, J., Skubalska, E. y Smutnicki, C, "On Flow Shop Scheduling with Reléase and Due Dates to
Minimize Máximum Lateness", *Journal ofthe Operational Research Society,* 34,615-20,1983.
Graham, R. L., "Bounds on Multiprocessing Timing Anomalies", *SIAM Journal on Applied Mathematics,* 17,416-429,1969. Gupta, J. N. D., "Heuristic Algorithms for Multistage Flow Shop Problem", *AIIE Transactions,* 4,11 -18,
1972. Huettle, J. "Finite Capacity Scheduling—Just a Luxury, Right?" *APICS: The Performance Advantage,*
junio, 1993,37-39. Jackson. J. R., "An Extensión of Johnson's Results on Job-Lot Scheduling", *Naval Research Logistics*
Quarterly, 3,201-204,1956.
Johnson, S. M., "Optimal Two-and Three-Stage Production Schedules with Setup Times Included", *Naval Research Logistics Quarterly,* 1,61-68,1954. Johnson, D. S., Aragón, C. R., Megeoch, L. A. y Schevon, C, "Optimization by Simulated Annealing: An
Experimental Evaluation; Part I, Graph Partitioning," *Operations Research,* 37, 865-892,1989.
Karp, R. M., "Reducibility Among Combinatorial Problems," en Miller, R. E. y Thatcher, J. W., eds., *Complexity of Computer Computations,* Plennum Press, Nueva York, 1972. Kim, Y. D., "Heuristics for Flowshop Scheduling Problems Minimizing Mean *Tardimss" Journal ofthe*
Operational Research Society, 44, 19-28,1993. Lasserre, J. B., "An Integrated Model for Job-Shop Planning and Scheduling", *Management Science,* 38,
1201-1211,1992. Little, J. D. C, Murty, K. G., Sweeney, D. W. y Karel, C, "An Algorithm for the Traveling Salesman
Problem", *Operations Research,* 11,979-989, 1963. McKay, K. N., Safayeni, F. R. y Buzacott, J. A., "Job-Shop Scheduling Theory: What Is Relevant?" *Interfaces,* 18, 84-90, 1988.
McNaughton, R., "Sequencing with Deadlines and *LossFuncúons", Management Science,* 6,1-12,1959.
Morton, T. E. y Pentico, D. W., *Heuristic Scheduling Systems,* John Wiley & Sons, Nueva York, 1993.
Muth, J. F. y Thompson, G. L, *Industrial Scheduling,* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1963.
Ogbu, F. A. y Smith, D. K., "The Application ofthe Simulated Annealing Algorithm to the Solution of the n/m/Cmax Flowshop Problem", *Computers & Operations Research,* 17,243-253,1990.
Osman, I. H. y Potts, C.N., "Simulated Annealing for Permutation Flow-Shop Scheduling", *OMEGA,* 17, 551-557,1989.
Panwalkar, S. S., Dudek, R. K. y Smith, M. L., "Sequencing Research and the Industrial Scheduling Problem", in *Symposium on the Theory of Scheduling and Its Application,* Elmaghraby, S. E., ed., Springer Publishing, Nueva York, 1973. Philipoom, P. R. y Fry, T. D., "The Robustness of Selected Job-Shop Dispatching Rules with Respect to
Load Balance and Work-Flow Structure", *Journal of the Operational Research Society,* 41, 897-906,1990.
Pinedo, M., *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems,* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995.
Rachamadugu, R. V. y Morton, T. E., "Myopic Heuristics for the Single Machine Weighted Tardiness Problem", *GSIA Working Paper 30-82-83,* Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 1982.
Reeves, C. R., "A Genetic Algorithm for Flowshop Sequencing", *Computers & Operations Research,* 22, 5-14,1995. Rinnooy Kan, A. H. G., *Machine Scheduling Problems: Classification, Complexity and Computations,*
Martinus Nijhoff, La Haya, Holanda, 1976. Smith, W. E., "Various Optimizers for Single Stage Production", *Naval Research Logistics Quarterly,* 3,
59-66,1956.

So, K. C, "Some Heuristics for Scheduling Jobs on Parallel Machines with Setups" *Management Science,* 36,467-475, 1990.

Sundararaghavan, P. y Ahmed, M., "Minimizing the Sum of Absolute Lateness in Single-Machine and Multimachine Scheduling", *Naval Research Logistics Quarterly,* 31,325-333, 1984.

Suresh, V. y Chaudhuri, D., "Dynamic Scheduling—A Survey of Research", *International Journal of Production Economics,* 32, 53-63, 1993.

Van Laarhoven, P. J. M., Aarts, E. H. y Lenstra, J. K., "Job Shop Scheduling by Simulated Annealing", *Operations Research,* 40,113-125, 1992.

Villarreal, E. J. y Bulfin, R. L., "Scheduling a Single Machine to Minimize the Weighted Number of Tardy Jobs", *HE Transactions,* 15,337-343, 1983.

Voet, M. y Dewilde, P., "Choosing a Scheduling Package", *APICS—The Performance Advantage,* noviembre, 1994, pp. 28-31.

Woosley, R. E. D. y Swanson, H. S., *Operations Research for Immediate Application: A Quick & Dirty Manual,* Harper & Row, Nueva York, 1975.

CAPÍTULO

9

Planeación, programación y control de proyectos

1 INTRODUCCIÓN

Lynn salió pasmada de la oficina del gerente de planta. El año siguiente, ella será la administradora del proyecto de la nueva impresora, la LJ9000. Como administradora de proyecto es responsable de las especificaciones y el diseño, los métodos de producción y la comercialización inicial del nuevo producto. El diseño, los métodos de producción y el momento para el lanzamiento son factores cruciales que afectan la calidad, el costo y el porcentaje de mercado del producto final. Los proyectos de alta tecnología requieren inversiones cada vez mayores. Al mismo tiempo, las presiones del mercado están forzando que ese tiempo sea más corto. El proyecto requiere un alto grado de interacción entre los expertos en diseño del producto, técnicas de producción, aseguramiento de la calidad y comercialización. Esta complejidad hace que sea más probable que se retrase y que se exceda el presupuesto.

Lynn se hace muchas preguntas mientras piensa sobre su nueva asignación. ¿Qué tan pronto puede llegar al mercado la impresora? ¿Existe una manera de reducir este tiempo? ¿Puede ella asegurarse de que no haya atraso? ¿Qué recursos necesita para llevar a cabo el proyecto? ¿Es suficiente la asignación de dinero? ¿Quién debe trabajar con ella y cómo debe organizar el equipo? Estas preguntas tienen respuesta en la planeación, programación y control de proyectos.

1.1 Proyectos

No es frecuente que las compañías introduzcan nuevos productos; entonces, ¿por qué dedicar un capítulo a planeación, programación y control de proyectos? La razón es que muchos otros problemas se puede ver como proyectos. Las aplicaciones típicas incluyen la movilización de una planta actual a una nueva, realizar mantenimiento preventivo en una máquina importante de una línea de producción, construir un complejo de departamentos, pavimentar una calle, lanzar una nave espacial, planear un campaña política y escribir un libro de texto.

Estos ejemplos tienen características comunes. Son complejos, se componen de muchas actividades y tienen especificada una meta. Formalmente, un **proyecto** se define como un conjunto de actividades interrelacionadas, parcialmente ordenadas, que deben realizarse para lograr la meta. Todos los ejemplos satisfacen esta definición. Por lo general, los proyectos tienen un inicio y una terminación definidos. Es común que ocurran sólo una vez o con muy poca frecuencia. Sin embargo, sí ocurren proyectos cíclicos o recurrentes, como la construcción de barcos. La meta puede ser terminar el proyecto tan pronto como sea posible, tan barato como se pueda o una combinación de ambas. Personas con diferentes antecedentes y habilidades trabajan en equipo para realizar el proyecto. Los miembros del equipo pueden estar involucrados en él parte del tiempo o en forma temporal, y regresar a sus trabajos normales una vez terminado.

A mediados de los años 50, varios equipos de investigación independientes desarrollaron enfoques similares para la planeación, programación y control de proyectos. Todos tuvieron éxito en cuanto a reducir los tiempos de terminación y los costos entre 30 y 40%. Una de las aplicaciones que recibió más publicidad fue el proyecto del misil Polaris para el U. S. Navy. Después del éxito con que se llevó a cabo, se *requirió* que algunos proyectos del gobierno usaran algunas componentes de la planeación, programación y control de proyectos. En la sección 9 se amplían estos antecedentes.

1.2 Planeación, programación y control

La planeación, la programación y el control son conceptos fundamentales de administración. **Planeación** es un enfoque organizado para lograr alguna meta (en este caso, el proyecto). Comienza por definir los objetivos del proyecto. Después se determinan las actividades que lo componen y cómo interactúan. Se estiman el tiempo y otros recursos requeridos para cada actividad. Con frecuencia, se hace una representación gráfica, en forma de **red,** de las actividades. Cada actividad corresponde a una flecha. Si una actividad precede a otra, las flechas se conectan por un nodo. La **programación** es el compromiso en el tiempo de los recursos requeridos para realizar el proyecto. Se asigna a cada actividad un tiempo de inicio y un tiempo de terminación. Estos tiempos determinan el tiempo de terminación del proyecto y el uso de recursos en el tiempo. El programa identifica ciertas **actividades críticas,** las cuales, si se retrasan, causan que la terminación del proyecto también se retrase. Las actividades criticas pueden justificar un mayor esfuerzo al estimar el tiempo y los recursos necesarios o incluso cambios en la actividad misma, para reducir el costo o el tiempo de terminación del proyecto. El **control** supervisa el progreso de las actividades del proyecto y revisa el plan según lo que ocurre.

La figura 9-1 muestra los pasos normales necesarios en un estudio de planeación, programación y control. Los bloques arriba de la línea punteada representan la etapa de planeación. Se define el proyecto y se desglosa en actividades o tareas. Se delinean las interrelaciones entre las actividades (es decir, la precedencia) y se crea la red correspondiente. Se determinan el tiempo y los recursos para cada actividad.

La siguiente etapa es la programación y consiste en la parte de la figura 9-1 entre las líneas punteadas. Se encuentran las actividades críticas y la duración del proyecto. Si las estimaciones de estas actividades no tienen la exactitud suficiente, se hacen mejores estimaciones. Si el tiempo para completar el proyecto es demasiado largo, debe acortarse la duración de las actividades críticas mediante subcontratación, tiempo extra, etcétera, hasta que sea aceptable. Lo mismo es cierto para los recursos usados por las actividades.

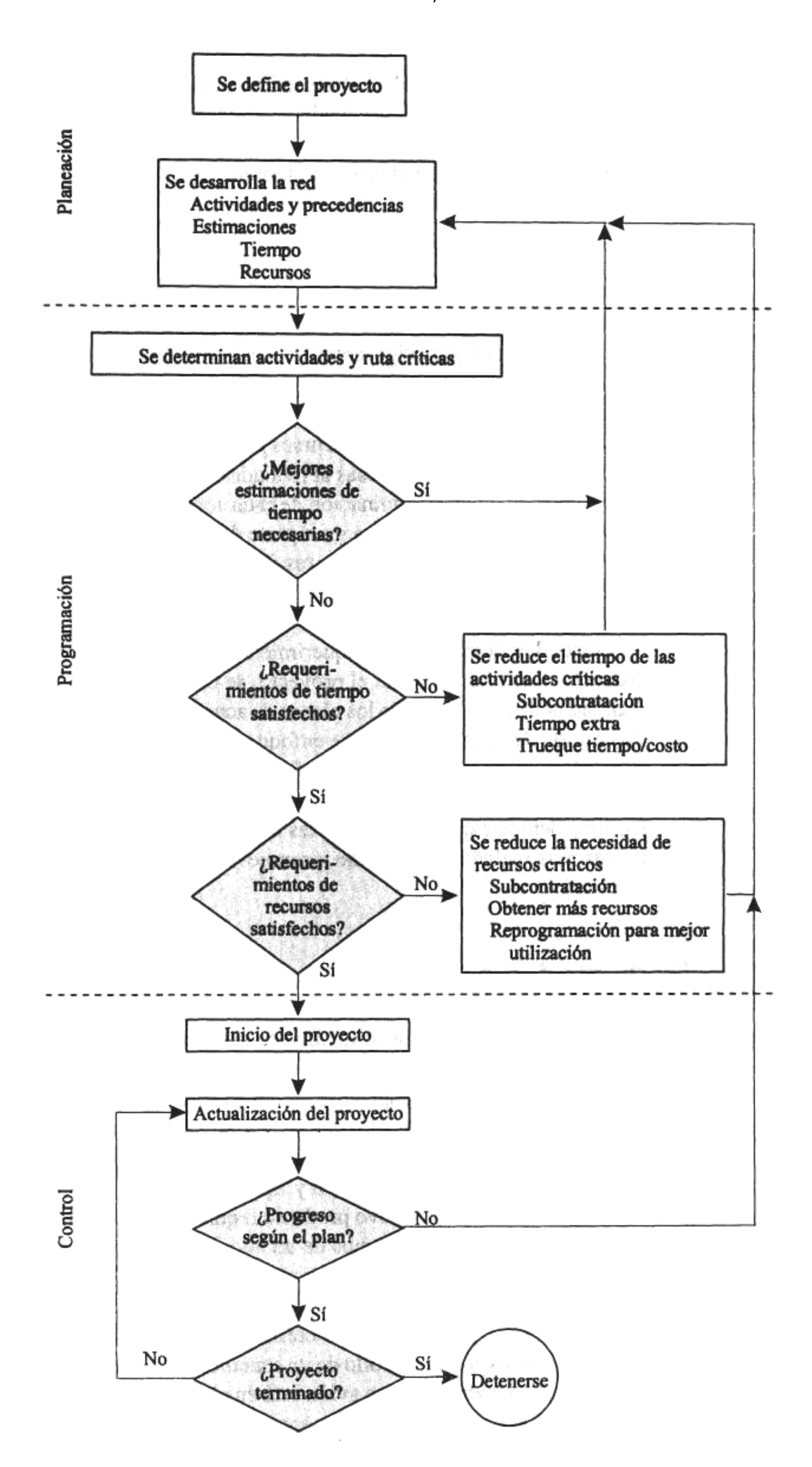


FIGURA 9-1
Pasos para un estudio de planeación, programación y control de proyectos

Por último, el control de actividades se muestra abajo de la línea punteada inferior. Conforme avanza el proyecto, se actualiza el estado de cada actividad. Si las actividades toman más tiempo o usan más recursos que los anticipados, será necesario volver a planear y programar. Esto continúa hasta que el proyecto termine.

1.3 Beneficios

La planeación, programación y control de proyectos proporciona muchas ventajas valiosas. La más importante es que exige, antes de su realización, un estudio profundo del proyecto. Esto da un mayor conocimiento de lo que hay que hacer y de cómo hacerlo. Es necesario establecer con claridad los objetivos del proyecto. El plan especifica las actividades que componen el proyecto, al igual que el tiempo y los recursos para llevar a cabo cada actividad. Todavía más, describe las interrelaciones entre esas actividades. El procedimiento se puede usar para determinar los tiempos de inicio y terminación de cada actividad y cuáles de ellas son críticas para el éxito global del proyecto. Se dedica gran parte de la atención a estas actividades críticas y se les da un control estrecho. Esto da como resultado un plan maestro basado en un panorama global en lugar de en un punto de vista local, y los objetivos globales no están supeditados a una parte más pequeña del proyecto.

Este plan determina los requerimientos completos de los recursos a través de la vida del proyecto. Conforme avanza el proyecto, se comparan los resultados esperados con lo que en realidad ocurre, y se revisan los planes de acuerdo con ello. También se puede llevar a cabo una planeación de "qué pasa si". Este enfoque ayuda a que los administradores cumplan con las fechas y los presupuestos planeados. Se puede usar en varios niveles de detalle, y asigna la responsabilidad de cada actividad a una persona específica. La comunicación y coordinación se facilitan debido a que todas las partes trabajan a partir de una base común. Se logran las expectativas más realistas. Por último, promueve un espíritu de camaradería entre los participantes en el proyecto.

1.4 Desarrollo de productos

El desarrollo de productos es un área de aplicación importante para la planeación, programación y control de proyectos. No es de sorprender que se abriera este capítulo con la tarea de Lynn de desarrollar una impresora. El desarrollo de un producto muestra qué tan complejo puede ser un proyecto; es por esto que se usa para mostrar el alcance, profundidad y complejidad de su planeación, programación y control. Este material está basado en el análisis de desarrollo de productos que presentan Ulrich y Eppinger (1995).

El desarrollo de un nuevo producto requiere mucho tiempo y dinero. Rara vez se desarrolla un nuevo producto en menos de un año. Un nuevo automóvil puede tomar de tres a cinco años y un nuevo medicamento diez años o más para su desarrollo. El costo, en general, es proporcional a la duración y al número de personas que trabajan en el proyecto.

La tabla 9-1 presenta las características de los esfuerzos de desarrollo dedicados a cinco productos. Incluso el desarrollo de un sencillo desarmador tarda un año, con un presupuesto de $150 000. El desarrollo de un avión está en el otro extremo, toma 4.5 años, 130 000 000 de dólares, 130 000 partes y, durante la época de mayor esfuerzo, 16 800 personas.

TABLA 9-1
Características y esfuerzos del desarrollo

	Desarmador Stanley Jobmaster	**Patines de ruedas en línea Bravoblade**	**Impresora HP Deskjet 500**	**Automóvil Chrysler Concorde**	**Avión Boeing 777**
Volumen de producción anual	100 000 unidades/año	100 000 unidades/año	1 500 000 unidades/año	250 000 unidades/año	50 unidades/año
Vida de las ventas	40 años	3 años	3 años	6 años	30 años
Precio de venta (dólares)	$3	$200	$365	$19 000	$130 millones
Número de partes únicas (número de parte)	3 partes	35 partes	200 partes	10 000 partes	130 000 partes
Tiempo de desarrollo	1 año	2 años	1.5 años	3.5 años	4.5 años
Equipo de desarrollo interno (tamaño máximo)	3 personas	5 personas	100 personas	850 personas	6800 personas
Equipo de desarrollo externo (tamaño máximo)	3 personas	10 personas	100 personas	1400 personas	10 000 personas
Costo de desarrollo (dólares)	$150 000	$750 000	$50 millones	$1000 millones	$3000 millones
Inversión de producción (dólares)	$150 000	$1 millón	$25 millones	$600 millones	$3000 millones

Fuente: De Ulrich y Eppinger (1995). Usado con permiso de The McGraw-Hill Companies, Inc.

El desarrollo de productos tiene cuatro características primordiales:

Trueque entre los parámetros de diseño, costo y desempeño, como un material compuesto contra un metal.
- Dinámica de mercado, por ejemplo, cambios tecnológicos y necesidades de los clientes

Atención a los detalles, como las tolerancias de cada parte Tiempo para comercializarlo

Se toma un gran número de diferentes tipos de decisiones durante el desarrollo de un producto.

Para manejar este entorno complejo se necesita un procedimiento paso a paso. Este procedimiento es una secuencia de actividades que sigue una organización para concebir, diseñar y comercializar un producto. Algunas organizaciones definen y siguen un proceso de desarrollo estructurado; otras tienen dificultades para definir el proceso. Más aún, la definición del proceso puede variar de una organización a otra. Existen muchas cosas en común en el proceso y es posible identificar un proceso de desarrollo de producto genérico.

Este proceso comienza con el establecimiento de la misión y termina con el lanzamiento de un producto al mercado. Se tienen cinco etapas entre el inicio y la terminación:

- Establecimiento de la misión

   1. Concepto de desarrollo
   2. Nivel de diseño del sistema
   3. Diseño detallado
   4. Pruebas y refinamiento
   5. Puesta en marcha de la producción

   Lanzamiento del producto

E1 establecimiento de la misión identifica el mercado meta y proporciona una descñpción funcional del producto, al igual que las metas de negocios del esfuerzo. £1 lanzamiento del producto tiene lugar cuando el producto está disponible para su compra en el mercado. La tabla 9-2 muestra las actividades que comprenden los cinco pasos. Relaciona éstas con las funciones organizacionales de mercadotecnia, diseño y manufactura.

El proceso de desarrollo del producto varía de una organización a otra, de manera que un procedimiento genérico se adapta al entorno local. El proceso específico usado por AMF Bowling aparece en la figura 9-2; muestra las actividades individuales del proceso y el papel que juegan en las distintas funciones de desarrollo. En la figura, las pruebas alfa se refieren a pruebas internas de prototipos anteriores. Los prototipos beta se evalúan ampliamente de manera interna, pero también los clientes los prueban en sus propios entornos.

Una adición interesante al proceso genérico es incluir tres indicadores importantes, la aprobación del proyecto, la fabricación del herramental inicial y la puesta en marcha de la producción. Cada indicador está sujeto a revisiones de primer orden.

Como se ve en la tabla 9.1, el desarrollo del producto involucra a muchas personas que trabajan en tareas diferentes. Los proyectos de desarrollo de productos exitosos tiene como resultado alta calidad, producción de bajo costo y una utilización eficiente del tiempo y del dinero. La planeación, programación y control del proyecto juegan un papel valioso en el desarrollo de un producto con éxito.

SECCIÓN 1 EJERCICIOS

9.1. ¿Qué es un proyecto?

9.2. Enumere los pasos que se siguen en la planeación, programación y control de un proyecto.

9.3. Describa el propósito de

a) la planeación
b) la programación
c) el control

9.4. Explique cinco situaciones en las que la planeación, programación y control de proyectos pueda ser útil. ¿Puede dar un ejemplo en el que no ayudaría? Explique.

9.5. Explique el proceso de desarrollo de la AMF Bowling (figura 9-2) en términos del proceso de desarrollo genérico de la tabla 9-2.

9.6. Compare los pasos del proceso de desarrollo de AMF con los pasos que se presentaron en la figura 9-1.

TABLA 9-2
Proceso de desarrollo genérico

Desarrollo del concepto	Diseño a nivel del sistema	Diseño de detalle	Pruebas y refinamiento	Puesta en marcha de la producción
Mercadotecnia				
• Definir segmentos de mercado • Identificar usuarios principales • Identificar productos de la competencia	Desarrollar un plan para opciones de productos y ampliación de familia de productos	Desarrollar el plan de mercadotecnia	Desarrollar materiales de promoción y lanzamiento Facilitar las pruebas de campo	Colocar la producción inicial con clientes clave
Diseño				
• Investigar la factibilidad de los conceptos del producto • Desarrollar conceptos de diseño industrial • Construir y probar prototipos experimen tales	[1] Generar arquitecturas del producto alternativas [1] Definir los subsistemas e interfases primordiales • Refinar el diseño industrial	[1] Definir la geometría de partes [1] Elegir materiales ■ Asignar tolerancias • Completar documentación de control del diseño industrial	Realizar pruebas de confiabilidad, vida útil y desempeño [1] Obtener aprobaciones reglamentarias [1] Implantar los cambios en el diseño	Evaluar la primera corrida de producción
Manufactura				
• Estimar costos de manufactura • Evaluar la factibilidad de la producción	Identificar proveedores de componentes clave [1] Realizar un análisis hacer-comprar [1] Definir esquema de ensamble final	[1] Definir producción de piezas-partes • Diseñar herramental • Definir proceso de aseguramiento de la calidad • Iniciar procuración de herramental con tiempo de entrega largo	Facilitar la contratación de proveedores * Refinar procesos de fabricación y ensamble > Capacitar fuerza de trabajo [1] Refinar proceso de aseguramiento de la calidad	Comenzar operación del sistema de producción completo
Otras funciones				
Finanzas: facilitar análisis económico Legal: investigar aspectos de patente	• Finanzas: facilitar análisis hacer-comprar • Servicio: identificar aspectos de servicios		• Ventas: desarrollar plan de ventas	

Fuente: De Ulrich y Eppinger (1995). Usado con permiso de The McGraw-Hill Companies, Inc.

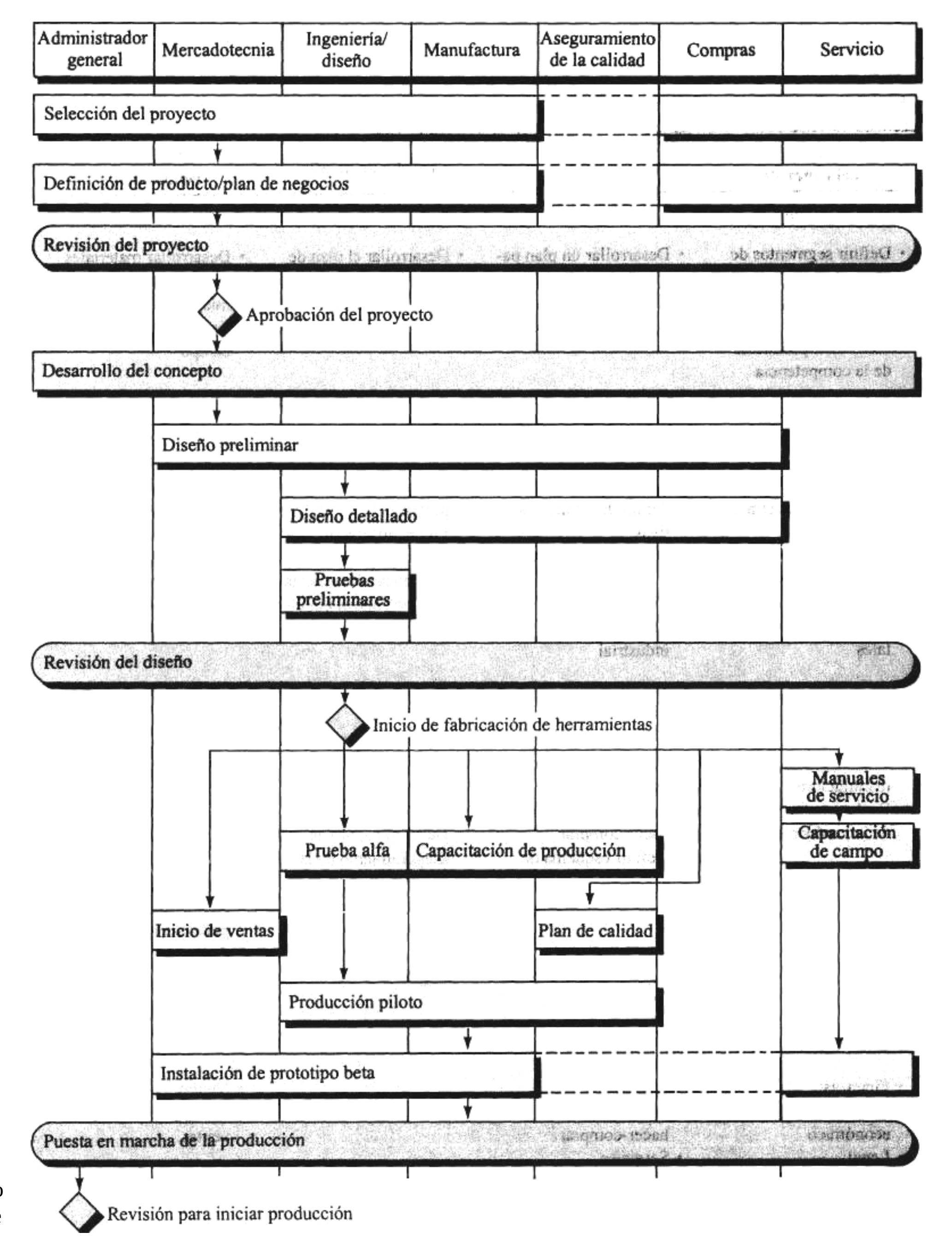


FIGURA 9-2
Proceso de desarrollo de AMF Bowling, de Ulrich y Eppinger (1995). Usado con permiso de The McGraw-Hill Companies, Inc.

2 PLANEACIÓN

Lo primero que debe hacerse es planear. La planeación incluye seleccionar las personas adecuadas para participar en el proyecto y organizarías de manera que éste tenga éxito; definir las metas del proyecto, y determinar las actividades que forman el proyecto, sus interrelaciones y el tiempo y los recursos necesarios para llevarlas a cabo.

2.1 Organización del proyecto

El primer paso es elegir al administrador del proyecto. Un administrador exitoso debe tener una fuerte orientación hacia el cumplimiento de metas y habilidades interpersonales. También son cualidades importantes la visión y la habilidad para prever problemas potenciales, junto con la flexibilidad y la creatividad para vencerlos. Las más importantes son liderazgo y habilidades de organización, en particular en el establecimiento de metas, la planeación y el análisis.

El administrador del proyecto reúne a un equipo de trabajo. Con frecuencia los miembros son expertos en sus respectivas áreas. Para muchos proyectos, los miembros del equipo trabajan en el proyecto sólo parte de su tiempo y continúan con sus obligaciones. El administrador del proyecto debe tener autoridad para elegir a todos los miembros del equipo.

En el capítulo 1 se analizaron las estructuras organizacionales. Es común que, en proyectos grandes, se use una organización funcional tradicional, donde el proyecto actúa como la "compañía". En el caso de proyectos pequeños, muchas veces se usa una organización divisional, con el administrador del proyecto a nivel de *staff.* El administrador del proyecto reporta al gerente general, y los miembros del equipo reportan a los administradores funcionales y no al administrador del proyecto. Para proyectos como el de Lynn con frecuencia se usa una organización matricial. El administrador del proyecto tiene la responsabilidad y el crédito de todo el proyecto, pero delega la autoridad sobre los expertos técnicos a los representantes del proyecto de ese departamento.

La comunicación en los proyectos es muy importante, en especial en las organizaciones matriciales. El objetivo es hacer llegar la información correcta a las personas adecuadas a tiempo para que tenga relevancia. Es normal que se hagan juntas programadas en tiempos especificados o cuando se completan eventos importantes en el proyecto, llamados **indicadores.** También se convoca a junta cuando surgen problemas. Puede ser necesario entregar reportes formales. Por ejemplo, un diseñador de instalaciones eléctricas puede entregar un informe semanal de avance al jefe del departamento de ingeniería eléctrica, quien a su vez puede remitir un informe semanal de avance de todas las actividades al administrador del proyecto.

2.2 Definición del proyecto

Una vez que se cuenta con el equipo y la organización, comienza la planeación. Primero, se determinan los objetivos del proyecto. Si hay varios objetivos en conflicto, se llega a un compromiso a través del consenso. Después, se asigna la responsabilidad de las diferentes áreas. Esto va seguido de una lista de los recursos disponibles para el proyecto. Por último, se definen los requerimientos de información y su disponibilidad. Como estos pasos dependen de la aplicación, no se puede profundizar en ellos. Sin embargo, esto no debe restarles importancia.

2.3 Definición de las actividades y la red

Después de determinar las especificaciones del proyecto, se enumeran las actividades que lo componen. Cada actividad debe tener un inicio específico y un punto de terminación. Las actividades se pueden definir a muchos niveles de detalle. Para Lynn, una actividad útil seria "diseñar la impresora". No obstante, para el equipo de diseño, esta actividad sería un proyecto completo desglosado en muchas actividades. Debe elegirse el nivel de detalle correcto para cada actividad con base en el usuario último y el propósito del proyecto. El nivel de detalle no debe ser mayor del necesario para asignar recursos y administrar la actividad.

Una actividad se representa por una flecha en una gráfica, donde la cola de la flecha es el inicio de la actividad y la punta es su terminación. Las flechas se llaman arcos u orillas. La figura 9-3 representa una actividad típica. La duración de la actividad y quizá una breve descripción se escriben arriba o abajo de la flecha. La longitud y el ángulo de la flecha no tienen un significado particular.

El inicio y la terminación de una actividad se llaman **eventos.** A diferencia de las actividades, no hay una duración asociada con un evento. En la gráfica, los eventos se representan por círculos, llamados **nodos,** y se asigna a cada evento un número único para identificarlo. En la figura 9-3, el nodo 1 representa el inicio de la actividad "diseñar impresora". Se usan los nodos de inicio y terminación para "nombrar" las actividades. En la figura 9-3, diseñar impresora es la actividad 1-2 o, en general, la actividad *i-j*.

Las actividades se pueden relacionar. Una relación entre dos actividades es la **precedencia;** una actividad no puede iniciar antes de que otra haya terminado. Por ejemplo, un nuevo producto no puede fabricarse hasta que esté terminado su diseño. Todas las relaciones de precedencia entre las actividades deben establecerse en forma clara. Sólo se incluyen precedencias que *deben* seguirse. Si se piensa que una actividad debe realizarse antes que otra, pero no existe una razón tecnológica para ello, no se incluye la precedencia entre las dos. La figura 9-4 muestra dos actividades, la actividad 1 -2 precede a la actividad 2-3. Los eventos en realidad representan varios puntos en el tiempo. En la misma figura, el evento 2 representa la terminación de la actividad 1-2 y el inicio de la actividad 2-3. La actividad 2-3 no tiene que comenzar en cuanto 1-2 termina, sino en cualquier momento después de que termina 1-2. Las precedencias implican que 2-3 no puede comenzar antes de que 1-2 termine. La actividad 1-2 se llama **predecesor** y la 2-3 **sucesor.**

Él evento 1 denota el inicio del proyecto; todas las actividades que no tienen predecesores lo comparten. Gomo ejemplo, considere las tres actividades que no tienen eventos predecesores mostradas en la figura 9-5. Como estas actividades no tienen predecesores, todas pueden iniciar de inmediato y estar en proceso simultáneamente; sin embargo no están obligadas a hacerlo; la etapa de programación, que se estudiará más adelante, determina qué actividades, de hecho, tienen que iniciar.

De manera similar, todas las actividades que no tienen sucesores comparten un evento de terminación, digamos, el evento w,que representa la terminación del proyecto. Esta situación se muestra en la figura 9-6. Igual que con los tiempos de inicio, compartir un evento de terminación no implica que todas estas actividades terminen al mismo tiempo.

Ahora considere dos o más actividades sin relación de precedencia entre ellas, pero que deben estar precedidas por una actividad común. De nuevo se puede combinar el evento terminación del predecesor con el evento inicio de todos los sucesores. Tal situación se describe en la figura 9-7. Cualquier nodo que tiene más de un arco que sale se llama **evento de bifurca-**

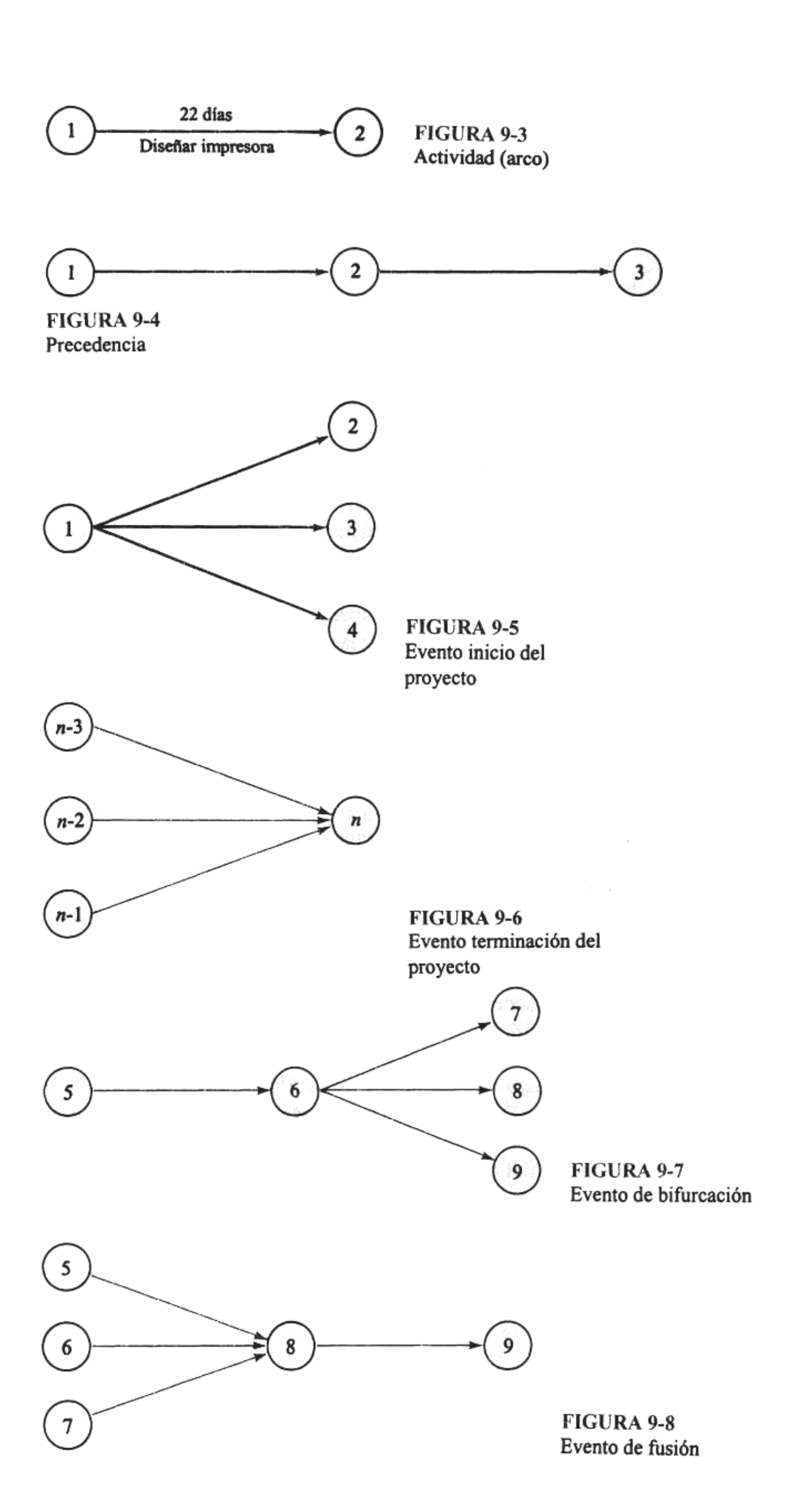


FIGURA 9-3
Actividad (arco)

FIGURA 9-4
Precedencia

FIGURA 9-5
Evento inicio del proyecto

FIGURA 9-6
Evento terminación del proyecto

FIGURA 9-7
Evento de bifurcación

FIGURA 9-8
Evento de fusión

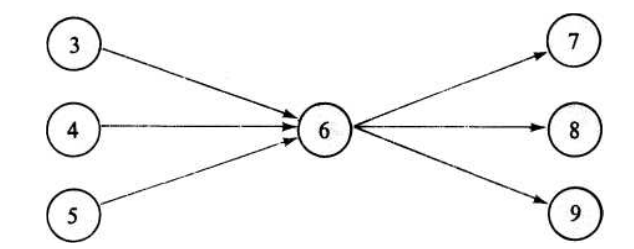


FIGURA 9-9
Evento de fusión y bifurcación

ción. Esto incluye el evento 6 en la figura 9-7 y el evento 1, de inicio del proyecto, en la figura 9-5. Como se hizo notar, ninguna de las actividades sucesoras puede iniciar antes de que sus predecesores terminen, pero no es necesario que comiencen justo efí ese tiempo, ni que los sucesores inicien en forma simultánea.

Si se tienen varias actividades sin precedencia entre ellas, pero todas preceden a otra, se pueden representar como en la figura 9-8. Un evento con más de un arco que llega se llama **evento de fusión.** El evento 8 en la figura 9-8 es un ejemplo; la terminación del evento también es una fusión. De nuevo observe que 8-9 no puede comenzar antes de que 5-8,6-8 y 7-8 terminen, pero no tiene que comenzar en cuanto eso ocurre, ni las tres actividades predecesoras tienen que terminar al mismo tiempo.

Es posible que un evento sea tanto de bifurcación como de fusión. Un ejemplo es el evento 6 en la figura 9-9.

Un proyecto se representa por una colección de nodos y arcos. Esta representación gráfica se llama **red.** La convención que se usa se llama red de actividades en las flechas. Existen otras representaciones. Cada evento debe tener un número único para evitar confusión. Por lo común, se asignan los números una vez que se ha desarrollado la red. Los eventos se numeran de manera que cada actividad tiene un número menor en su evento de inicio que en su evento de terminación. Si esto no se puede hacer, debe haber un ciclo en la red, lo que es imposible que ocurra en un proyecto real. Más aún, se requiere que cada actividad tenga un par único de eventos inicial y final, es decir, dos arcos no pueden comenzar y terminar en los mismos nodos. Esto permite que cada actividad quede especificada de manera única por sus eventos correspondientes.

Ahora considere un proyecto con cuatro actividades llamadas A, B, C y D. Suponga que A precede tanto a C como a D, y B precede a D. Dibujar esta red es más difícil. La red de la figura 9-10 implica que B precede a D, lo cual es incorrecto. Para tener una representación correcta, se debe agregar un arco ficticio. Un arco ficticio no representa una actividad real, sólo conserva la lógica de la red. Las actividades ficticias en general se dibujan con arcos punteados, no tie-

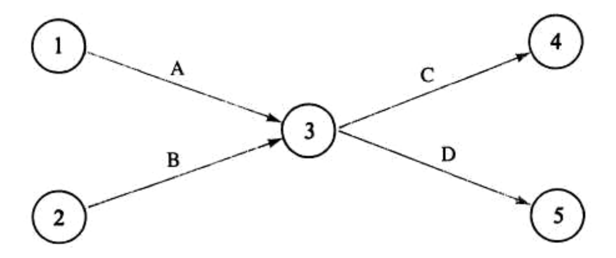


FIGURA 9-10
Precedencia incorrecta

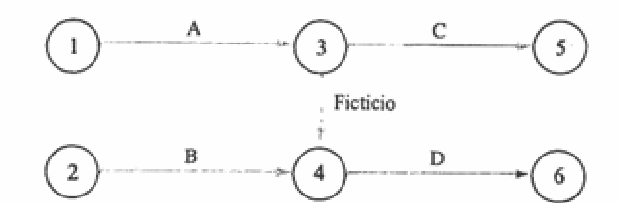


FIGURA 9-11
Precedencia correcta

nen duración y no requieren recursos. La figura 9-11 muestra una representación de la red correcta para esta situación.

2.4 Estimación de la duración de las actividades

Una vez que se ha desarrollado un bosquejo de la red de todo el proyecto, es necesario determinar cuánto tiempo toma efectuar cada actividad. Al hacerlo, deben obtenerse estimaciones tan exactas como sea posible, dentro del alcance del estudio. Primero debe elegirse una unidad de tiempo; pueden ser minutos, horas, días, semanas o incluso quincenas. La unidad básica debe reflejar el nivel de detalle del trabajo que se tiene. Seria inapropiado usar minutos para construir una casa; días o semanas pueden ser más adecuados. Si la unidad de tiempo básica es días, no tendrán que estimarse las duraciones con una medida más pequeña que días completos. Si se necesita mayor precisión, normalmente sólo para proyectos de corta duración, la unidad de tiempo básica debe cambiarse a medios días o a horas.

Es común que se convoque a una junta de todas las partes involucradas para estimar la **duración** de cada actividad. Se selecciona una actividad al azar y se hace un breve análisis. La estimación del tiempo debe ser independiente de todas las demás actividades, y debe suponerse que se hará un esfuerzo "normal" para realizar la actividad en cuestión. Todavía más, no deben considerarse sucesos poco usuales, como huelgas o accidentes. Es obvio que la persona responsable de la actividad debe tener mejor idea de cuánto ha de durar. Desafortunadamente, esta persona puede estar sesgada o puede dar una estimación mayor de la que se espera que la tarea requiera, sólo para quedar bien cuando termine adelantada. Como no hay manera de saber para eliminar el sesgo, debe simplemente aceptarse la posibilidad. Otros miembros del equipo también pueden estimar la duración, y si los resultados tienen una diferencia considerable, se abre una discusión para resolver la estimación. Sin embargo, en el análisis final, el "experto" debe tener más peso en la decisión. También es razonable que las estimaciones sean más precisas cuando se trata de tareas pequeñas. Por ejemplo, es probable que la estimación de Lynn del tiempo para colocar la impresora en el mercado sea menos exacta que su estimación del tiempo para preparar los planos de producción.

Debe tenerse cuidado cuando se trata del tiempo. Suponga que se tienen una semana de cinco días hábiles y que la unidad de tiempo es días. Puede haber actividades que necesitan días "naturales" para terminarse, y este tiempo podría aprovecharse en fines de semana. Un ejemplo es el proceso de fraguado del concreto. Si se cuela en viernes, se seca durante el sábado y domingo aun cuando no se trabaje. Con un poco de cuidado se pueden manejar los problemas de tiempo de trabajo contra tiempo calendario.

Después de estimar la duración de cada actividad, los requerimientos de recursos para cada actividad, incluyendo los costos, deben manejarse de la misma manera.

TABLA 9-3
Datos del proyecto de la impresora LJ9000

Actividad	Descripción	Tiempo (sem)	Precedencia
A	Especificaciones de impresora	2	B,C
B	Presupuesto y necesidades de calidad	3	D,E
C	Diseño de impresora	5	F,G
D	Preparación de formas de licencia	4	H
E	Aprobación de presupuesto	1	I
F	Construcción de prototipo	6	I
G	Diseño del empaque	2	J
H	Aprobación de licencia	8	—
I	Pruebas del prototipo	7	—
J	Construcción del empaque	4	—

Éste también es el momento de refinar la red. Por ejemplo, si alguna actividad se puede realizar en menos de una unidad de tiempo, tal vez deba combinarse con otra u otras actividades. Si dos actividades ocurren en serie, sin otro precedente antes de la segunda de la serie, es posible combinar estas actividades en una. Por supuesto, esto no debe hacerse si una o ambas actividades necesitan quedar explícitas por alguna razón.

Ejemplo 9-1. Planeación de la LJ9000. Después de analizar con detenimiento su tarea, Lynn divide el proyecto en dos subproyectos. El primero maneja todas las actividades necesarias para la producción de un prototipo aprobado. El segundo incluye la producción inicial y la comercialización de la impresora. Se estudiará su enfoque para el primer subproyecto.

Después de consultar con otros miembros del equipo, Lynn define un plan maestro del proyecto, usando sólo las actividades principales. Éstas, junto con sus duraciones y relaciones de precedencia se dan en la tabla 9-3. Con esta información, Lynn desarrolló la red del proyecto que se muestra en la figura 9-12.

SECCIÓN 2 EJERCICIOS

9.7. Defina la preparación de una comida como un proyecto. Desarrolle una red, defina las preceden
cias y estime la duración de cada actividad.

9.8. Defina el cambio de una llanta como un proyecto. Desarrolle una red, defina las precedencias y
estime la duración de cada actividad.

9.9. Dibuje las siguientes redes de proyectos. Las actividades se denotan por letras y A -> B significa
que la actividad B no puede iniciar antes de que la actividad A termine.

a) A->C B-*C A-*D
b) A-»B A->C A-»D B-»E C-»E D-»E
c) A->B A->C B->D B-*E C->E D-»F E-»F
d) A->C A-»E B->D C-+G D-»F E-*F E-»G

3 PROGRAMACIÓN

Una vez que se ha determinado la red, se querrán calcular los tiempos en los que pueden ocurrir las cosas, el más importante es la terminación del proyecto. Para cada actividad, se calcula el tiempo más cercano, al igual que el tiempo más lejano en que puede comenzar y terminar. Para

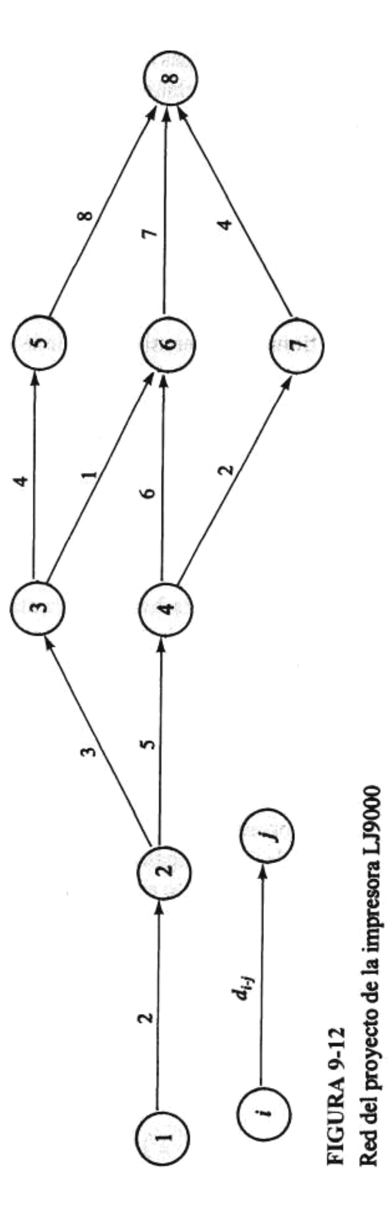


FIGURA 9-12
Red del proyecto de la impresora LJ9000

cada evento, también se calcula un tiempo más cercano y un tiempo más lejano para su ocurrencia. Esto se hace en dos etapas, un recorrido por la red hacia adelante y otro hacia atrás. La pasada hacia adelante es una serie de cálculos que comienzan con el evento de inicio del proyecto y determina el tiempo más cercano en que puede terminar. Al hacerlo, asigna el tiempo de inicio y terminación más cercano posible a cada actividad. La pasada hacia atrás es el inverso de la pasada hacia adelante; asigna un tiempo de terminación deseado al evento final y calcula el inicio y la terminación más lejanos para cada actividad, de manera que el proyecto termine en el tiempo deseado: Sea

i-j = una actividad del proyecto
d_H = duración de la actividad i-j
E_i = **tiempo más cercano** en que el evento i puede ocurrir
ES_H = **tiempo de inicio más cercano** para la actividad i-j
EF_{Uj} = **tiempo de terminación más cercano** para la actividad i-j
LS_{Uj} = **tiempo de inicio más lejano** de la actividad i-j
LF_H = **tiempo de terminación más lejano** de la actividad i-j
L_l = **tiempo más lejano** para el evento /

Se supone que el evento 1 es el evento de inicio y n es el evento final.

3.1 Pasada hacia adelante

El propósito de la **pasada hacia adelante** es calcular los tiempos de inicio y terminación más cercanos para cada actividad del proyecto. Si se conoce el tiempo de inicio más cercano de una actividad, su tiempo de terminación más cercano es el tiempo de inicio más cercano más su duración:

$$EF_H = ES_H + d_H$$

(vea la figura 9-13). Para obtener los tiempos de inicio más cercanos para las actividades y los tiempos más cercanos para los eventos se requiere pensar un poco. Se supone que una actividad comienza tan pronto como todos sus predecesores terminan. Si una actividad, digamos k-j, tiene sólo un predecesor, digamos i-k, su evento inicial, k, no es un evento de fusión. La ocurrencia más cercana del evento es la misma que la terminación más cercana de la actividad predecesora, es decir,

$$E_k = EF_{i\text{-}k}$$

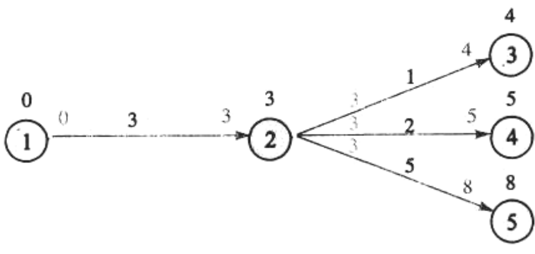


FIGURA 9-13
Pasada hacia adelante (sin evento de fusión)

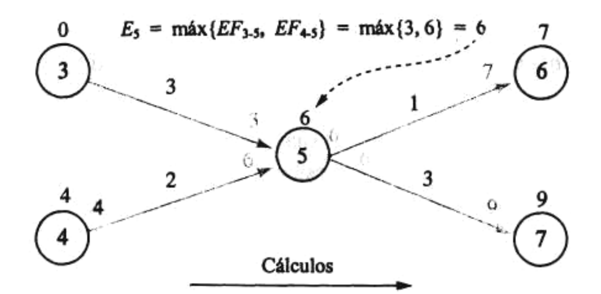


FIGURA 9-14
Pasada hacia adelante para un evento de fusión

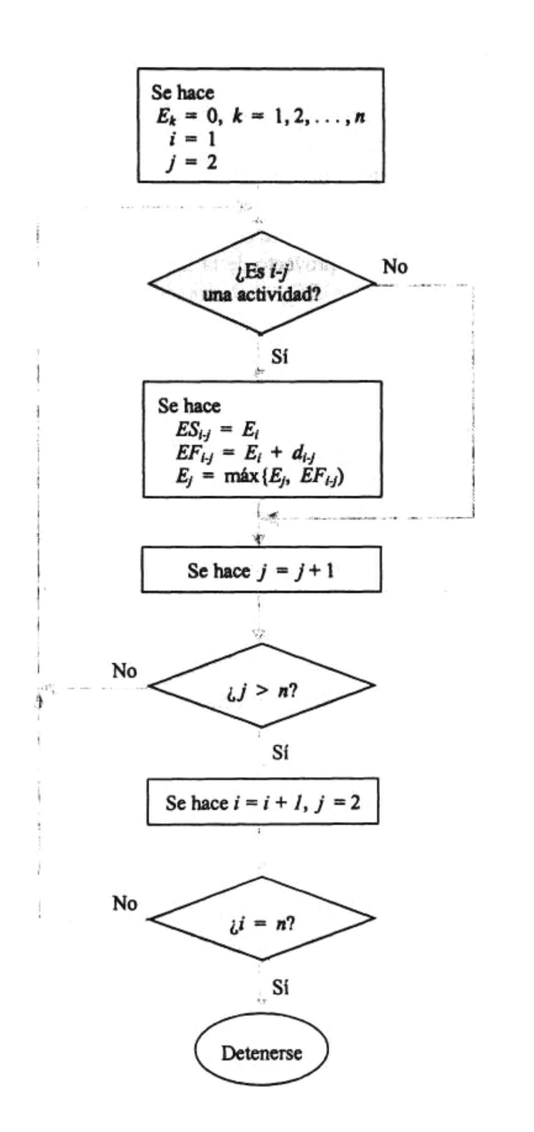


FIGURA 9-15
Algoritmo para la pasada hacia adelante

Éste también es el tiempo de inicio más cercano de todas las actividades para las que este evento representa el evento inicial,

$$ES_{k\text{-}l} = E_k \qquad \text{para todas las actividades } k\text{-}l$$

Los eventos de fusión tienen más de una actividad predecesora y que no pueden suceder hasta que todos los predecesores están terminados. El tiempo más cercano es el tiempo de terminación más largo de cualquier actividad que tiene a éste como evento final:

$$E_k = \text{máx}_{\text{toda } i\text{-}k}\, EF_{i\text{-}k}$$

De nuevo, el inicio más cercano de todas las actividades con este evento como evento inicial es el tiempo más cercano del evento,

$$ES_{k\text{-}l} = E_k \qquad \text{para todas las actividades } k\text{-}l$$

Esto se muestra en la figura 9-14. Los eventos de bifurcación no tienen un papel específico en la pasada hacia adelante.

La figura 9-15 presenta un procedimiento formal para la pasada hacia adelante. Supone que todos los nodos están ordenados de manera que si i-j es una actividad en la red, $i < j$. A continuación se da un ejemplo de la pasada hacia adelante.

Ejemplo 9-2. Pasada hacia adelante para el proyecto LJ9000. Se realizarán los cáclulos de la pasada hacia adelante para el proyecto de la impresora LJ9000. Primero, el algoritmo establece $E_i = 0$, $i = 1, 2, \ldots, 8$ y $ES_{i\text{-}j} = EF_{i\text{-}j} = 0$ para todos los arcos. El primer arco examinado es 1-2:

$$ES_{1\text{-}2} = E_1 = 0$$
$$EF_{1\text{-}2} = ES_{1\text{-}2} + d_{1\text{-}2} = 0 + 2 = 2$$
$$E_2 = \text{máx}\{E_2, EF_{1\text{-}2}\} = \text{máx}\{0, 2\} = 2$$

Estos cálculos se encuentran en el primer renglón de la tabla 9-4. Primero se enumeran las actividades, después se da el valor real de su evento inicial. Éste se convierte en el tiempo de inicio más cercano para la actividad, que se muestra en la siguiente columna. Sigue la duración, que se suma al tiempo de inicio para obtener el tiempo de terminación más cercano para la actividad. Por último, el tiempo más cercano del evento final de la actividad se sustituye por el tiempo más cercano de terminación de la actividad, si éste es mayor que el tiempo más cercano de terminación actual. Para mostrar estos cálculos en el caso de un evento de bifurcación, se analizará la actividad 3-6:

$$ES_{3\text{-}6} = E_3 = 5 \qquad \text{de los cálculos de 2-3}$$
$$EF_{3\text{-}6} = ES_{3\text{-}6} + d_{3\text{-}6} = 5 + 1 = 6$$
$$E_6 = \text{máx}\{E_6, EF_{3\text{-}6}\} = \text{máx}\{0, 6\} = 6$$

y para 4-6 se tiene

$$ES_{4\text{-}6} = E_4 = 7 \qquad \text{de los cálculos de 2-4}$$
$$EF_{4\text{-}6} = ES_{4\text{-}6} + d_{4\text{-}6} = 7 + 6 = 13$$
$$E_6 = \text{máx}\{E_6, EF_{4\text{-}6}\} = \text{máx}\{6, 13\} = 13$$

Sólo se muestran estos cálculos. El resto se da en la tabla 9-4. Los cálculos de la pasada hacia atrás también se muestran en la red de la figura 9-16. Observe que la pasada hacia adelante asigna un tiempo de inicio más cercano de cero al evento "inicio" y trabaja hacia el evento "terminación", siempre comenzando las actividades tan pronto como sea posible. Cuando se completa la pasada hacia adelante, E_n es el tiempo más cercano en el que el proyecto puede terminar. A menos que se pueda cambiar la duración de una o más actividades críticas (vea la sección 3.3) o la estructura de precedencia, el proyecto LJ9000 quedará terminado no antes de $E_8 = 20$ semanas.

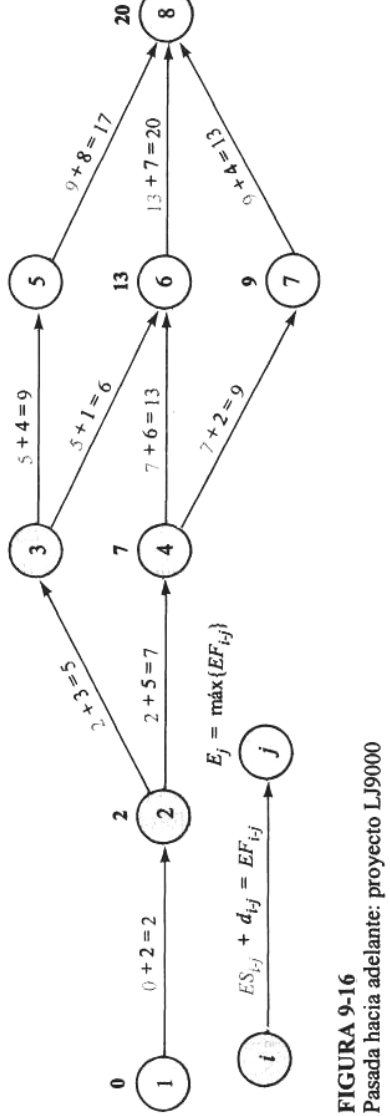


FIGURA 9-16
Pasada hacia adelante: proyecto LJ9000

TABLA 9-4
Cálculos de la pasada hacia adelante para LJ9000

i-j	E_i	ES_{i-j}	d_{i-j}	EF_{i-j}	E_j
1-2	0	0	2	2	máx{0, 2} = 2
2-3	2	2	3	5	máz{0, 5} = 5
2-4	2	2	5	7	máx{0, 7} = 7
3-5	5	5	4	9	máx{0, 9} = 9
3-6	5	5	1	6	máx{0, 6} = 6
4-6	7	7	6	13	máx{6, 13} = 13
4-7	7	7	2	9	máx{0, 9} = 9
5-8	9	9	8	17	máx{0, 17} = 17
6-8	13	13	7	20	máx{17, 20} = 20
7-8	9	9	4	13	máx{20, 13} = 20

3.2 Pasada hacia atrás

El propósito de la **pasada hacia atrás** es calcular el inicio más lejano permitido y el tiempo de terminación para cada actividad, de manera que el proyecto termine en el tiempo especificado. Es el proceso inverso de la pasada hacia adelante. La pasada hacia atrás comienza con la terminación del proyecto y trabaja hacia el inicio. Si se conoce el tiempo de terminación más lejano para una actividad, su tiempo de inicio más lejano es ese tiempo de terminación menos su duración, es decir,

$$LS_H = LF_H - d_H$$

Si una actividad tiene sólo un sucesor (es decir, si no es un evento de bifurcación), la ocurrencia más lejana del evento es igual al inicio más lejano de la actividad sucesora.

Lk-LSkj

Éste también es el tiempo de terminación más lejano de todas las actividades para las que este evento representa el evento de terminación, es decir,

$$LF_{i4í} = L_k \qquad \text{para toda } i\sim k$$

La figura 9-17 es un ejemplo de esta situación.

Los eventos de bifurcación tienen más de una actividad sucesora y, por lo tanto, la ocurrencia del evento más lejano no puede tener lugar hasta que todos los sucesores hayan comenzado. En este caso, el tiempo del evento más lejano es el tiempo de inicio lejano más pequeño

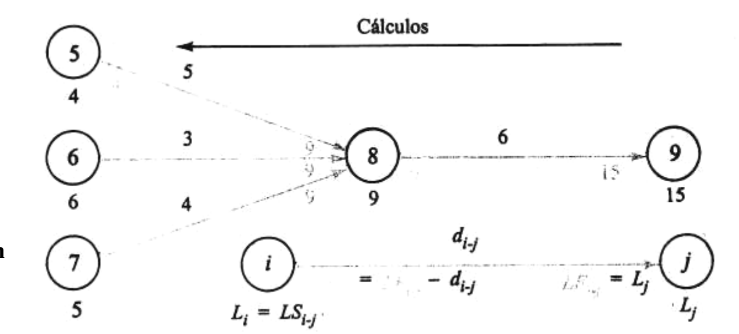


FIGURA 9-17

Pasada hacia atrás: sin evento de bifurcación

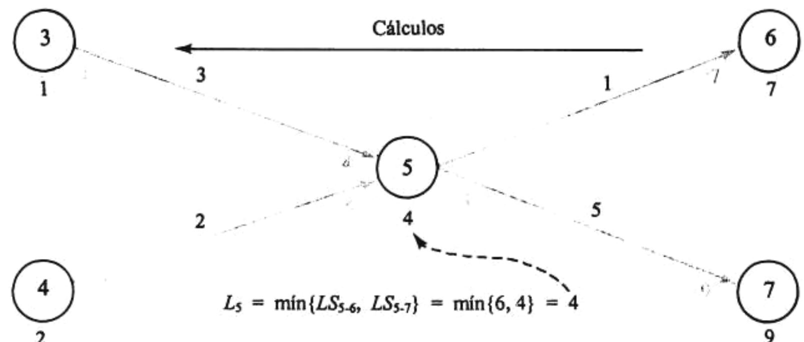


FIGURA 9-18
Pasada hacia atrás: evento de bifurcación

Se hace
$L_k = E_n,\ k = 1, 2, \ldots, n$
$i = 1$
$j = n$

¿Es i-j una actividad?

No

Sí

Se hace
$LF_{i\text{-}j} = L_j$
$LS_{i\text{-}j} = L_j - d_{i\text{-}j}$
$L_i = \text{mín}\{L_i,\ LS_{i\text{-}j}\}$

Se hace $i = i + 1$

No

¿$i > n$?

Sí

Se hace $j = j - 1,\ i = 1$

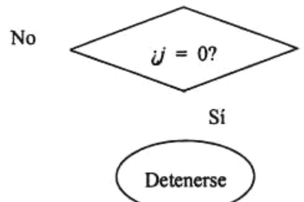


FIGURA 9-19
Algoritmo de pasada hacia atrás

de cualquier actividad con este evento como el evento inicial:

$$L_k = \text{mín}_{\text{toda } k\text{-}j} LS_{k\text{-}j}$$

De nuevo, la terminación más lejana de todas las actividades con este evento como evento final es el tiempo lejano del evento.

$$LF_U = L_k \text{ para todas las actividades } i\text{-}k$$

Esto se muestra en la figura 9-18. Los eventos de fusión no juegan un papel específico en la pasada hacia atrás. Formalmente, el algortimo de pasada hacia atrás, con las mismas suposiciones que antes, se describe en la figura 9-19.

Ejemplo 9-3. Pasada hacia atrás para el proyecto LJ9000. Ahora Lynn está lista para hacer la pasada hacia atrás para el proyecto de la impresora LJ9000. La pasada hacia atrás se inicia con el tiempo más lejano para la terminación del proyecto igual al tiempo de terminación más cercano: se establece $L_k = E_s = 20$ para toda k. La primera actividad que examina el algoritmo es 5-8:

$$LF_{5\text{-}8} = L_8 = 20$$
$$LS_{5\text{-}8} = LF_{5\text{-}8} - d_{5\text{-}8} = 20 - 8 = 12$$
$$L_5 = \text{mín}\{L_5, LS_{5\text{-}8}\} = \text{mín}\{20, 12\} = 12$$

Otra vez, se muestran sólo algunos cálculos; la tabla 9-5 contiene los cálculos completos. Pasando a la actividad 4-7, se tiene

$$LF_{4\text{-}7} = L_7 = 16$$
$$LS_{4\text{-}7} = LF_{4\text{-}7} - d_{4\text{-}7} = 16 - 2 = 14$$
$$L_4 = \text{mín}\{L_4, LS_{4\text{-}7}\} = \text{mín}\{20, 14\} = 14$$

y para 4-6:

$$LF_{4\text{-}6} = L_6 = 13$$
$$LS_{4\text{-}6} = LF_{4\text{-}6} - d_{4\text{-}6} = 13 - 6 = 7$$
$$L_4 = \text{mín}\{L_4, LS_{4\text{-}6}\} = \text{mín}\{12, 7\} = 7$$

El inicio más lejano para la actividad 1-2 es cero, y para el evento de inicio (evento 1) el tiempo más lejano es cero. Esto ocurre porque se usó el tiempo de terminación más cercano (20) como el tiempo de terminación más lejano para el proyecto. Si se usara otro valor, esto no ocurriría.

Es sencillo realizar estos cálculos en la misma red. La figura 9-20 muestra la red y los valores asociados para el proyecto LJ9000.

TABLA 9-5
Cálculos de la pasada hacia atrás para LJ9000

i-j	L_j	$LF_{i\text{-}j}$	$d_{i\text{-}j}$	$LS_{i\text{-}j}$	L_i
5-8	20	20	8	12	mín{20, 12} = 12
6-8	20	20	7	13	mín{20, 13} = 13
7-8	20	20	4	16	mín{20, 16} = 16
4-7	16	16	2	14	mín{20, 14} = 14
3-6	13	13	1	12	mín{20, 12} = 12
4-6	13	13	6	7	mín{12, 7} = 7
3-5	12	12	4	8	mín{20, 8} = 8
2-4	7	7	5	2	mín{20, 2} = 2
2-3	8	8	3	5	mín{2, 5} = 2
1-2	2	2	2	0	mín{20, 0} = 0

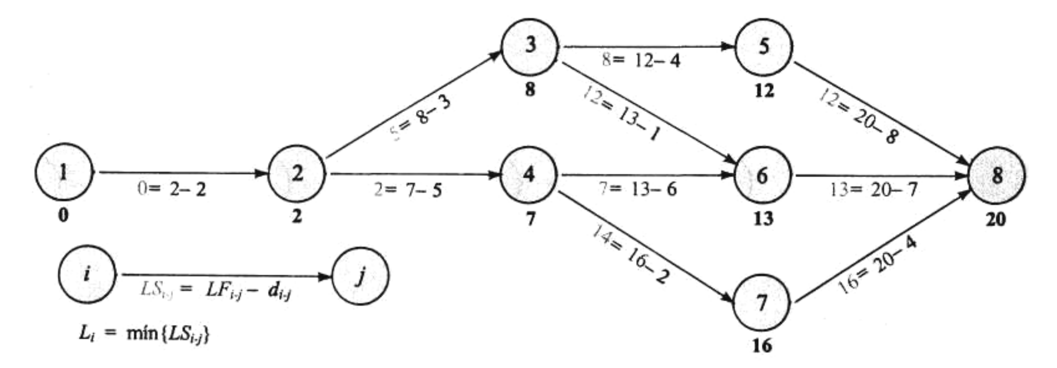


FIGURA 9-20
Pasada hacia atrás para LJ9000

3.3 Ruta crítica y actividades críticas

Una vez realizadas las pasadas hacia adelante y hacia atrás, se conoce bastante sobre el tiempo potencial del proyecto. Se sabe qué tan pronto puede terminar el proyecto; combinando la información de cada pasada se puede determinar qué actividades deben realizarse en sus tiempos más cercanos y cuáles pueden retrasarse sin afectar la terminación del proyecto. Primero, se define la **holgura** de la actividad *i-j* como *S¡_j = LSy - ES¡_j* (o, de manera equivalente, *LF¡_j - EFí_J)*. Si se inicia la pasada hacia atrás con el tiempo mínimo de terminación del proyecto, la holgura es el tiempo que se puede retrasar la actividad *i-j* sin retrasar todo el proyecto. Si una actividad con holgura cero no inicia ni termina en su tiempo más cercano, el proyecto completo se retrasa. Estas actividades reciben el nombre de **actividades críticas.**

Considere la ruta de 1 (el inicio del proyecto) a *n* (la terminación del proyecto) formada por las actividades 1 -/, *i-j*, *...J-ky k-n.* Es normal que existan muchas trayectorias de este tipo en una red. Si se hace $L_n = E_n$, existe al menos una trayectoria de 1 a *n* que tiene una holgura cero para todas las actividades en ella. Esta trayectoria se llama **ruta crítica,** porque todas las actividades en ella son críticas. Esto da lugar al tradicional nombre del procedimiento, el **método de la ruta crítica** o CPM (Kelly y Walker, 1959). Si se retrasa cualquier actividad en la ruta crítica, se retrasará el proyecto. Cada actividad en la ruta crítica se puede ver como una actividad de cuello de botella.

Existen varias trayectorias cuyas actividades tienen todas holgura cero y, por lo tanto, varias rutas críticas. Además, distintas trayectorias pueden tener actividades en común y después divergir, tener actividades distintas y luego converger para compartir actividades en la ruta, o tener una combinación de éstas.

La holgura cero tiene una interpretación sencilla, pero debe tenerse cuidado con la holgura positiva. Se puede pensar que una actividad con *Sy* = 2 se puede retrasar dos unidades sin afectar la terminación de todo el proyecto, y en cierto sentido esto es correcto. Se puede retrasar la actividad *i-j* dos unidades de tiempo y no retrasar el proyecto *si* no se retrasan otras actividades. Esto es, la holgura de una actividad es válida sólo si ninguna otra actividad se retrasa. Si se retrasa más de una actividad, la terminación del proyecto puede quedar afectada, aun cuando ninguna actividad individual se retrase más que su holgura. Se regresa al proyecto LJ900 para examinar este aspecto.

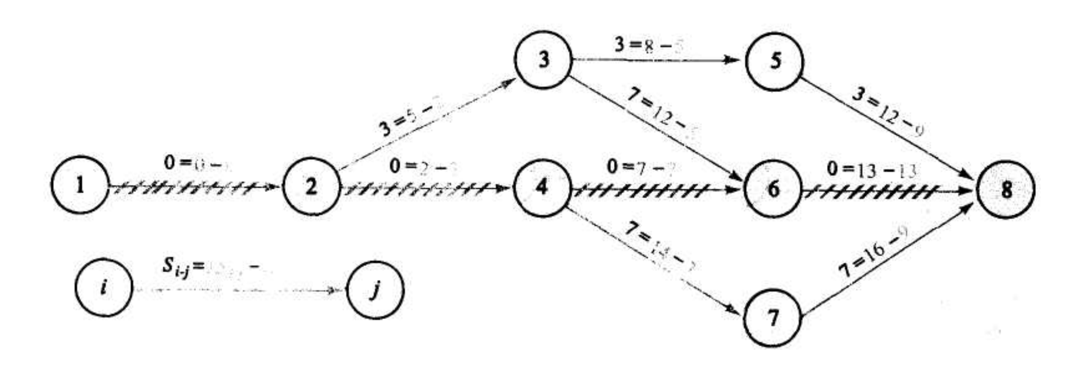


FIGURA 9-21
Ruta crítica para LJ9000

Ejemplo 9-4. La ruta crítica para el proyecto LJ900. La figura 9-21 muestra la red para el proyecto LJ90O0. La holgura de cada actividad se calculó a partir de los tiempos de inicio más cercano y más lejano. La ruta crítica, denotada por los arcos marcados con diagonales, es 1-2,2-4,4-6 y 6-8. Observe que la holgura es 3 en cada uno de los arcos 2-3,3-5 y 5-8. Suponga que cada una de estas tres actividades se retrasa dos unidades de tiempo; el proyecto se retrasará tres unidades. De este simple ejemplo se ve que la holgura en la trayectoria es más importante que la holgura de una actividad individual. Para entender mejor esto, note que retrasar 2-3 una unidad de tiempo equivale a sumar 1 a d_{l2}. Al hacer los cálculos con la nueva duración se obtienen holguras de 2 en 3-5 y 5-6. Se pueden definir otros tipos de holguras, pero por brevedad se omiten.

Es obvio que las actividades en la ruta critica deben administrarse con cuidado, ya que pueden retrasar todo el proyecto. Se puede pensar que las actividades no criticas se pueden ignorar, pero esto no es cierto. Si una actividad tiene poca holgura, un pequeño descuido en el tiempo para realizar ésta u otras actividades en la ruta, pueden convertirla en una ruta critica. Con esto en mente, se definen de manera informal las actividades casi criticas como aquellas que tienen poca holgura, donde "poca" depende de la situación particular. Todas la actividades deben administrarse con cuidado; sin embargo las críticas y las casi críticas merecen atención especial.

En los cálculos de la pasada hacia atrás se estableció $L_n = E_n$. Ésta fue, en cierto sentido, una decisión arbitraria. Se podría hacer $L_n = 0$, pero entonces todos los tiempos de inicio y terminación lejanos serían negativos. Algunos de ellos son negativos si $L_n<E_n$\ esto ocurre si la fecha de entrega es anterior a la terminación más cercana del proyecto. También, la holgura puede ser negativa. Al igualar la terminación lejana del proyecto a la terminación cercana, el resultado es que la holgura de las actividades criticas es cero. Si el proyecto tiene una fecha de entrega posterior al tiempo de terminación cercano, se puede dar este valor al tiempo de terminación lejano y hacer la pasada hacia atrás. Así se obtienen los tiempos de inicio y terminación para completar el proyecto en el tiempo deseado. Ninguna actividad tendrá holgura cero, por lo que no se tiene la ruta crítica que se encontró. Sin embargo, una o más trayectorias tienen todas las actividades con holgura mínima. La holgura mínima es igual a la diferencia entre los tiempos de terminación cercano y lejano del proyecto. Tal trayectoria se llama trayectoria de holgura mínima, y corresponde a la rata crítica cuando $L_A = E_n$.

Para encontrar las actividades casi críticas, se hace $L_n = E_n$ -ly se calcula la ruta crítica de nuevo. Todas las actividades críticas tiene ahora holgura de -l,y las actividades con holgura cero se llaman casi críticas. Cualquier trayectoria formada por estas actividades casi críticas se

llama la primera trayectoria casi crítica. Puede no haber actividades con holgura cero, entonces se hace $L_n = E_n$ - 2, y así sucesivamente, hasta que se encuentra la primera trayectoria casi crítica. Si se continúa reduciendo L_{n9} se puede encontrar la segunda y otras trayectorias casi críticas.

Una vez determinada la ruta crítica, se puede querer obtener estimaciones más exactas de la duración de las actividades críticas y casi críticas. Es poco probable que las actividades con mucha holgura afecten la duración del proyecto, así que sus estimaciones originales no parecen necesitar refinamiento. Si se confía en las estimaciones iniciales de las actividades críticas, pueden quedarse como están, de otra manera valdrá la pena dedicarles más atención.

3.4 Programación de actividades

Con las pasadas hacia adelante y hacia atrás terminadas, se comienza la programación de actividades. Programar implica asignar un tiempo de inicio a cada actividad; esta asignación se llama un **programa.** Por razones lógicas, una actividad no puede iniciar antes de su tiempo de inicio más cercano y, si se quiere terminar el proyecto enZ,n, tampoco puede comenzar después de su inicio más lejano. Entonces, el tiempo asignado debe estar entre el inicio más cercano y el más lejano de esa actividad. Existen dos programas que con frecuencia se analizan en la administración de proyectos. El primero es el **programa de inicio cercano,** en el que todas las actividades comienzan tan pronto como es posible. El segundo es el **programa de inicio lejano,** que asigna el inicio más lejano posible a todas las actividades.

Existen muchos otros programas. Con restricciones de recursos y presupuesto, no se quiere ninguno de los dos anteriores, ni son factibles. No obstante, se considerarán sólo esos dos.

Ejemplo 9-5. Programas de inicio cercano e inicio lejano para LJ9000. Para construir el programa de inicio cercano (o lejano) para el proyecto LJ9000, simplemente se comienza cada actividad tan pronto (o tan tarde) como se puede. Para ilustrar esto, se muestra cada programa en una red con

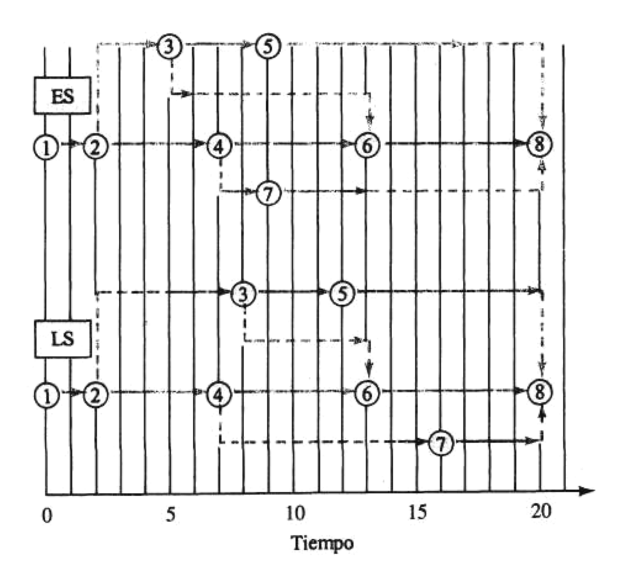


FIGURA 9-22
Programas de inicio cercano y lejano para el proyecto LJ9000

escala de tiempo, que es similar a una gráfica de Gantt. El eje horizontal es el tiempo, que va de cero a E_n. Las actividades se dibujan horizontales, con longitud igual a su duración. En general, la ruta crítica se centra en el eje vertical con las actividades críticas adyacentes. Las otras trayectorias se representan en distintos niveles verticales con líneas horizontales y mostrando las precedencias. La holgura se dibuja con líneas punteadas. La figura 9-22 contiene arriba el programa de inicio cercano (ES) y abajo el de inicio lejano (LS).

En el programa ES, la ruta crítica es 1-2-4-6-8, representada por líneas continuas. La actividad 2-3 comienza en el tiempo 2 y, como está precedida por 1 -2, una línea vertical punteada va del nodo 2 al inicio de 2-3. La actividad 3-6 comienza en el tiempo 5 y termina en el tiempo 6. Su holgura de 7 se representa por la línea horizontal punteada. El programa LS se interpreta de manera similar.

3.5 Aceleración del proyecto

El tiempo para completar el proyecto es crítico, en particular en los proyectos de desarrollo de productos. Si el tiempo para comercializar un producto es demasiado largo, la competencia puede capturar el mercado o puede evaporarse la demanda del producto. Ulrich y Eppinger (1995) dan sugerencias para acelerar un proyecto; ellos dividen el proyecto en enfoques para el proyecto y enfoques para las actividades críticas. Para el proyecto completo:

- Inicie el proyecto antes. Con frecuencia la urgencia para terminarlo no se presenta al principio. Sin embargo, el tiempo ahorrado al inicio se traduce en una terminación más rápida.
- Administre el alcance del proyecto. Una vez establecida la misión, manténgala. No permita que agregados o mejoras lo retrasen. Un proyecto retrasado, aunque sea elegante, de todas maneras está retrasado.
- Facilite que la información se comparta. Asegúrese de que los miembros del equipo conozcan el estado de las actividades.

Las actividades en la ruta crítica se pueden acelerar para disminuir el tiempo de terminación del proyecto. Si se comprimen, otras trayectorias pueden convertirse en críticas. Una guía es:

Termine las actividades críticas más rápido. Centrar la atención en una actividad puede ser suficiente para que termine antes. Asegúrese de que los recursos estén disponibles para las actividades críticas; aumentarlos tal vez puede reducir la duración. Se examinará esto con más detalle en las secciones 6 y 7.

Elimine por completo algunas actividades críticas. Si se rediseña el producto o el proceso, puede eliminarse una actividad crítica, reduciendo el tiempo de terminación.

- Elimine los retrasos por espera para las actividades críticas. Asegúrese de que sus recursos están disponibles. Intente simplificar o terminar por adelantado el papeleo para estas actividades.
- Traslape las actividades críticas. Puede ser posible comenzar una actividad crítica sucesora antes de completar la anterior. Un ejemplo puede ser el colado del piso de un centro comercial grande. Puede no ser necesario esperar hasta que esté colado todo el piso; cuando se tiene una parte puede comenzar el colocado del recubrimiento.

Ponga en secuencia las tareas grandes. Similar al traslape, la secuencia divide una tarea larga en tareas secuenciales más cortas. Encontrar y evaluar a muchos proveedores puede

hacerse con una parte o componente a la vez, cuando termina una explosión de materiales parcial.

Subcontrate actividades. Aunque esto puede ser costoso^ puede valer la pena terminar el proyecto con anticipación.

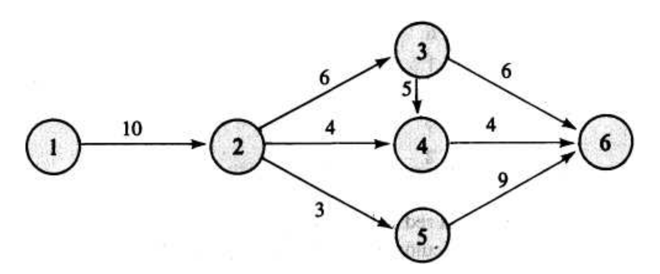
Esta guía es consistente con las ideas de ingeniería concurrente (capítulo 2) y la reducción de tiempos de preparación (capítulo 10) y se estudian con más detalle ahí.

SECCIÓN 3 EJERCICIOS

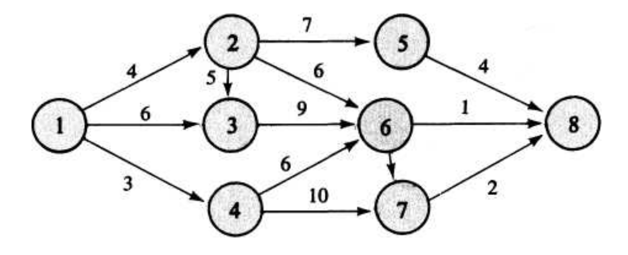
9.10. ¿Cuál es el propósito de los cálculos de la pasada hacia adelante?

9.11. ¿Qué papel juega un evento de bifurcación en los cálculos de la pasada hacia adelante? ¿Y un evento de fusión?

9.12. Dada la siguiente red, utilice los cálculos de la pasada hacia adelante para determinar la longitud del proyecto si éste comienza en el tiempo cero. Todos los tiempos están en días.



9.13. Dada la siguiente red, utilice los cálculos de la pasada hacia adelante para determinar la longitud del proyecto si éste comienza en el tiempo cero. Todos los tiempos están en semanas.



9.14. ¿Cuál es el propósito de los cálculos de la pasada hacia atrás?

9.15. ¿Qué papel juega un evento de bifurcación en la pasada hacia atrás? ¿Y un evento de fusión?

9.16. Realice los cálculos de la pasada hacia atrás en el ejercicio 9.12.

a) Suponga que se necesita que el proyecto termine cuanto antes.
b) Suponga que se necesita que el proyecto termine en 30 días.

9.17. Realice los cálculos de la pasada hacia atrás en el ejercicio 9.13.

a) Suponga que se necesita que el proyecto termine cuanto antes.
b) Suponga que se necesita que el proyecto termine en 20 semanas.

9.18. Defina la ruta crítica. ¿Qué son las actividades críticas?

9.19. ¿Por qué es importante identificar las actividades críticas y una ruta crítica?

9.20. ¿Qué es holgura? ¿Es la holgura siempre cero para alguna actividad? Explique.

9.21. Determine la ruta crítica para el ejercicio 9.12.

9.22. Determine la ruta crítica para el ejercicio 9.13.

9.23. Construya una gráfica de Gantt del programa de inicio lejano para el ejercicio 9.13.

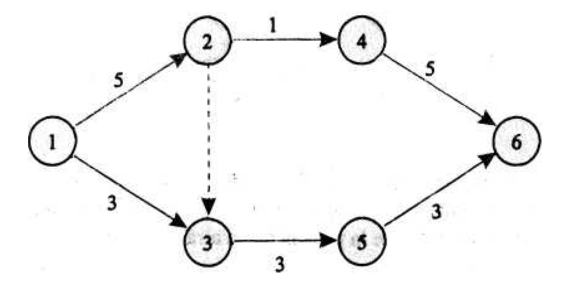
9.24. Construya los programas de inicio cercano y lejano para el ejercicio 9.12. Dibuje una gráfica de Gantt con una escala de tiempo.

9.25. Un proyecto de mantenimiento consiste en 10 actividades etiquetadas A, B,..., J. La duración (en días) y las precedencias se dan en la tabla.

Actividad	Duración	Precedencias
A	7	B,C
B	2	D,F
C	4	E,G
D	3	H
E	5	I
F	6	I
G	1	J
H	5	—
I	9	—
J	8	—

a) Desarrolle la red del proyecto.
b) Haga los cálculos hacia adelante y hacia atrás.
c) ¿Cuál es la holgura para las actividades D, F y J?
d) Encuentre todas las trayectorias con la misma holgura.
e) Encuentre una ruta crítica y las actividades críticas.
/) Encuentre la segunda ruta crítica.
g) Suponga que B toma seis días en lugar de tres. ¿Qué cambio ocurre en la terminación del proyecto?

9.26. Considere el proyecto descrito por la siguiente red.



a) Desarrolle y resuelva un modelo de programación lineal para encontrar la ruta crítica y la holgura para cada actividad,
b) Formule el problema dual e interprételo respecto al análisis de la ruta crítica.

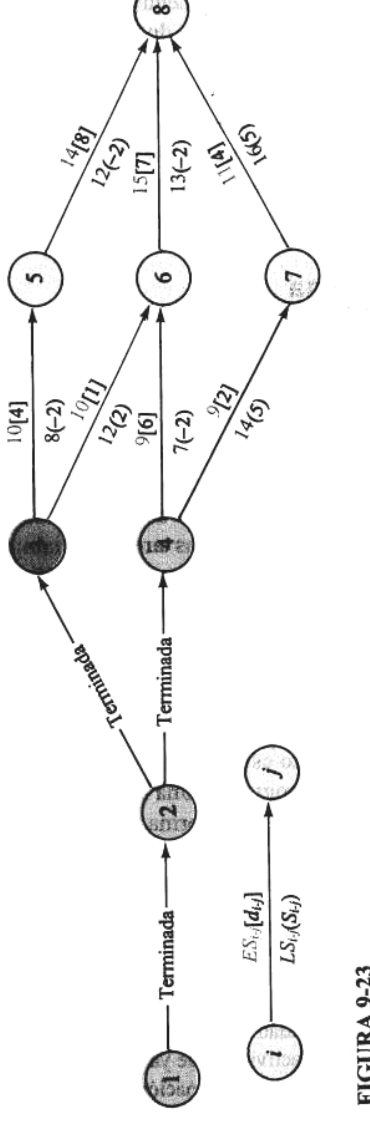


FIGURA 9-23
Red actualizada para el proyecto LJ9000

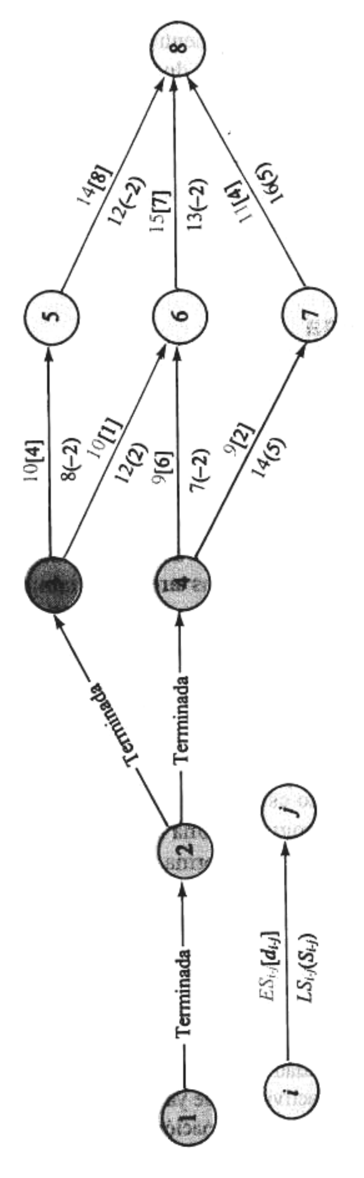


FIGURA 9-23
Red actualizada para el proyecto LJ9000

TABLA 9-6
Datos mactualizados de LJ9000

i-j	$d_{i\text{-}j}$	$LS_{i\text{-}j}$	$AS_{i\text{-}j}$	$AF_{i\text{-}j}$	$Ad_{i\text{-}j}$
1-2	2	0	0	2	*2*
2-3	3	5	6	3	
2-4	5	2	2	9	7
3-5	4	8	10	—	—
3-6	1	12	—	—	—
4-6	6	7	9		—

Varías actividades tienen holgura negativa, como 4-6 y 3-5, que se debe a la variación del plan original. La holgura más pequeña es -2, entonces, a menos que se ponga algún remedio, el proyecto terminará dos semanas después del tiempo de terminación planeado. Observe que ahora se tienen dos rutas críticas, 3-5-8 y 4-6-8.

4.2 Control de costos

La preocupación principal ha sido el tiempo, ya que es el aspecto primordial en la administración de proyectos. También debe cuidarse el aspecto del costo. El costo es importante en la planeación, programación e implantación. Primero, debe determinarse el costo de cada actividad, por lo común, al mismo tiempo y de la misma manera que se determinan las duraciones. Después, en la etapa de programación, puede ser deseable que los costos ocurran de cierta forma. Por ejemplo, puede quererse que los costos sean uniformes durante la vida del proyecto o, tal vez, que los costos ocurran tan tarde como sea posible. Por último, se usan los costos como un mecanismo de control. Se compara lo planeado con lo que ocurre en realidad; si los costos reales son más altos, se encuentra por qué y, si es posible, se hace algo para corregirlos, o si son más bajos, se encuentra por qué y se intenta continuar con los buenos resultados.

Existen varios tipos de costos. Algunos se pueden relacionar con facilidad a una actividad específica. Éstos se llaman costos directos y pueden incluir mano de obra, materiales, subcontratación o equipo usado sólo en esa actividad. Los costos indirectos o generales no tienen una relación directa con una actividad.

Las estructuras de contabilidad tradicionales no son muy buenas para el costeo del proyecto, ya que están orientadas a las organizaciones funcionales. Una manera de costear un proyecto es el sistema de control costo/programación C/SCS (USAFSC, 1976), que es similar a un enfoque administrativo matricial. El proyecto se divide en partes llamadas **paquetes de trabajo** o **estructuras de desglose del trabajo,** y se asignan costos.

Un paquete de trabajo en proyectos pequeños puede ser una actividad, pero en proyectos grandes puede consistir en muchas actividades. Si se define el proyecto en varios niveles, un paquete de trabajo puede ser un grupo de actividades del nivel más bajo. Estas actividades requieren una habilidad común, por ejemplo, todas aquellas que se necesiten para desarrollar cierta componente.

Un paquete de trabajo debe representar el trabajo al nivel que se realiza. Debe haber un inicio y una terminación programados, poderse distinguir de otros paquetes de trabajo, tener un presupuesto bien definido y poder asignarse a un solo elemento organizacional. Esto asegura que la persona correcta tenga la responsabilidad y la autoridad sobre el paquete de trabajo. Igual que en la administración matricial, este esquema contable con frecuencia cruza las líneas funcionales.

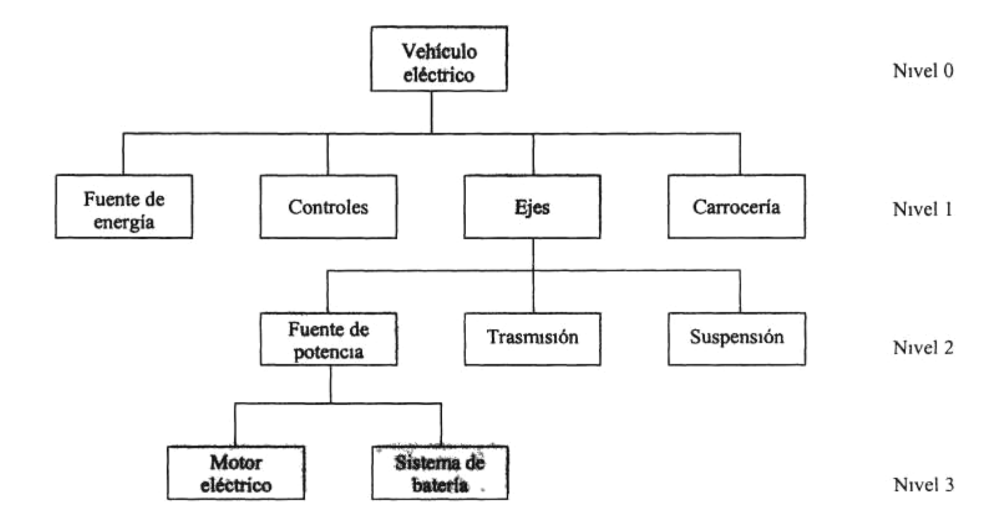


FIGURA 9-24
Estructura de desglose del trabajo para EMS

Ejemplo 9-7. Estructura de desglose del trabajo. La Electric Mobile Systems Company (EMS) está desarrollando un vehículo eléctrico para ciudad. La compañía usa administración de proyectos para planear, programar y controlar los proyectos. La figura 9-24 muestra parte de su estructura de desglose del trabajo.

Sólo se muestra un desglose por nivel. La estructura termina en el nivel 3. Para cada elemento del nivel 3, se desarrolla un paquete de trabajo. Este paquete, es por lo general, un proyecto en sí, con su propia red, recursos y costos.

4.2.1 Planeación y programación de costos

Al planear el proyecto, existe un control sobre cuándo se gasta el dinero. Sea *c¿_j* el costo por unidad de tiempo asociado con la actividad *i-j*, y suponga que el costo ocurre a una tasa constante durante la actividad. Así, si el costo para realizar la actividad *i-j* es $100, y su duración es de 10 días, se espera gastar $10 cada día que la actividad está en proceso. El tiempo de inicio real de todas las actividades determina el tiempo de los gastos. Estos costos se pueden graficar contra el tiempo, como se verá en el siguiente ejemplo.

Ejemplo 9-8. Curva de costos acumulada para los programas ES y **LS.** Considere el proyecto LJ9000. Los datos de cada actividad, incluyendo los costos (en miles de dólares), se presentan en la tabla 9-7. Suponiendo que todas las actividades comienzan en su inicio cercano, se puede graficar el costo acumulado contra el tiempo. Para cada periodo, se suman los costos por tiempo de todas las actividades en proceso y se agregan las sumas de todos los periodos anteriores. Esto da una curva que gasta dinero tan pronto como se puede.

Si todas las actividades comienzan en su inicio lejano se obtiene una curva diferente. Estas gráficas se muestran en la figura 9-25. No importa qué programa se use, el costo total será $341 000. El área entre estas curvas representa todos los tiempos posibles en que se hacen los gastos, para programas que terminan el proyecto lo más pronto posible. Al permitir que las actividades comiencen en sus tiempos de inicio cercano y lejano, se puede construir una variedad de programas con diferente

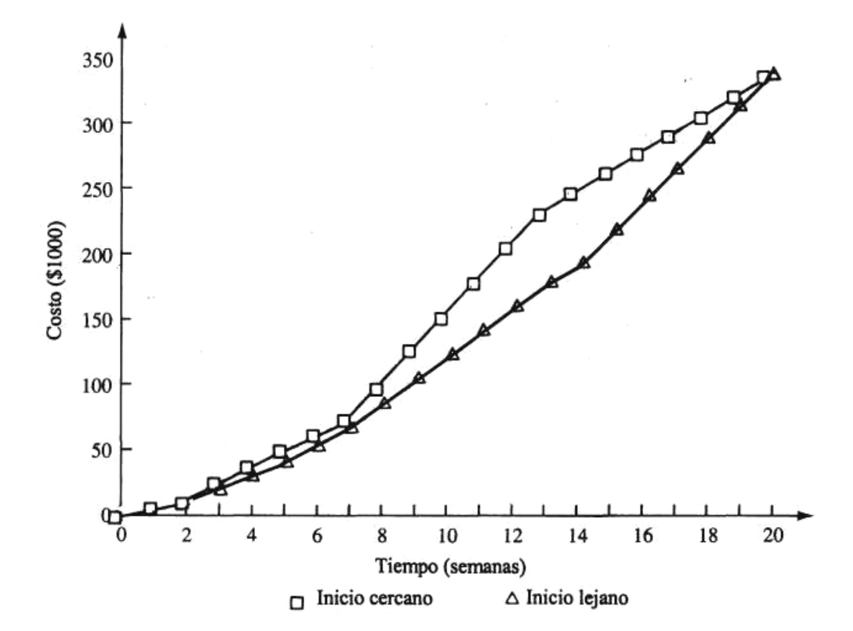


FIGURA 9-25
Utilización del costo acumulado para programas de inicio cercano y lejano

tiempo para los gastos. Sin embargo, debe observarse que el gasto total del proyecto completo es constante, y sólo se controla el tiempo en que se hacen los gastos, lo cual afecta el valor presente del proyecto. Se pueden implantar métodos más formales para cambiar los tiempos, manejando el costo como un recurso fijo y usando técnicas de programación con restricción de recursos.

TABLA 9-7
Datos de control de costos para LJ90O0

i-j	d_{i-j}	ES_{i-j}	LS_{i-j}	Costo	Costo por semana
1-2	2	0	0	10	5
2-3	3	2	5	9	3
2-4	5	2	2	50	10
3-5	4	5	8	4	1
3-6	1	5	12	1	1
4-6	6	7	7	102	17
4-7	2	7	14	20	10
5-8	8	9	12	0	0
6-8	7	13	13	105	15
7-8	4	9	16	40	10

4.2.2. Control

El administrador del proyecto debe controlar la duración y los costos del mismo para que su gestión sea efectiva. En especial, los costos reales del trabajo hecho deben compararse con los costos esperados del trabajo terminado, y el trabajo esperado debe compararse con el trabajo logrado real. Esto se puede hacer a nivel de la actividad, de los paquetes de trabajo y del proyecto para determinar el comportamiento del costo.

La comparación de los costos reales con los presupuestados puede dar una falsa impresión. Si el gasto es menor que el presupuesto, pero el proyecto está atrasado, corre peligro de excederse. Esto se debe a que se ha logrado menos trabajo que el planeado. Entonces deben tomarse en cuenta los gastos reales y los planeados y el trabajo desempeñado. Para ello, se puede usar el Cost/Schedule Control System Criteria (CSCSC) desarrollado para la U.S. Air Forcé (USAFSC, 1976).

El **costo real del trabajo desempeñado** (CRTD) es el dinero gastado en realidad para lograr el trabajo que se ha hecho. El **costo presupuestado del trabajo desempeñado** (CPTD) es el costo esperado del trabajo real hecho hasta el momento. El **costo presupuestado del trabajo programado** (CPTP) es el costo esperado del trabajo que se programó para este momento. El CPTP se calcula como en la figura 9-25 para un programa en particular. El CPTD se calcula de la misma manera pero sólo para aquellas actividades terminadas o en progreso. El CRTD se calcula de manera parecida, pero usando los costos reales en lugar de los proyectados.

La figura 9-26 es una gráfica de CPTD, CRTD y CPTP para las primeras 10 semanas de un proyecto. En la gráfica, los costos reales (CRTD) exceden a los presupuestados para el trabajo desempeñado (CPTD) y, en apariencia, el proyecto está fuera de presupuesto. La diferencia entre CPTD y CRTD se llama variancia del costo, y se define como

$$V^c = \text{CPTD} - \text{CRTD}$$

Ésta es la distancia entre las líneas CPTD y CRTD en la figura 9-26. Si $V^c > 0$ (CPTD > CRTD), el costo presupuestado es mayor que el real, entonces se ha gastado menos de lo previsto. Un V^c negativo (CPTD < CRTD) significa que en este momento el presupuesto está excedido. En la semana 10, V^c = $92 000 ($140 000 - $48 000), en apariencia, un exceso significativo.

No obstante, si se ha terminado más trabajo que el planeado, es de esperarse que los gastos reales sean más altos. Observando el costo presupuestado del trabajo desempeñado, se ve que

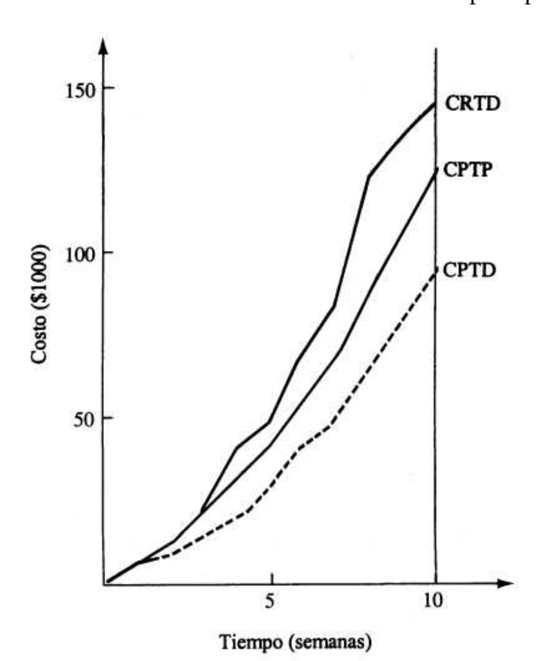


FIGURA 9-26
Costo actualizado del trabajo desempeñado y programado

no es así. De hecho, como la línea CPTD está abajo de la línea CPTP, se ha hecho menos trabajo de lo planeado. De manera similar, la variancia del programa se puede definir como

$$V^s = \text{CPTD} - \text{CPTP}$$

Aunque V^s está en unidades de dólares, mide el avance, puesto que compara el desempeño presupuestado con el desempeño real. V^s es la distancia entre CPTD y CPTP en la gráfica. Si $V^s >$ 0 (CPTD > CPTP), el "valor" del trabajo logrado es mayor que el presupuesto para hacerlo. Si V es negativo, se ha hecho menos trabajo que el esperado por el dinero gastado. Para el proyecto al que se refiere la figura 9-26, se tiene V^s = $92 000 - $ 122 000 = - $30 000. Esto indica un exceso. Ambas variancias son negativas, de manera que el proyecto está atrasado y fuera de presupuesto.

Estas técnicas proporcionan un buen panorama del avance del proyecto en cualquier punto en el tiempo. Existen variaciones sobre estas medidas, por ejemplo, porcentajes de las variancias. Se encuentran más detalles en muchos libros sobre control de proyectos. Con poco esfuerzo, se pueden usar para extrapolar eventos futuros. Esto resulta invaluable para el administrador del proyecto.

Ahora el lector está familiarizado con las tres etapas primordiales de la administración de proyectos —planeación, programación y control—. El cuadro 9-1 narra la historia del uso de administración de proyectos en 3M Health Care.

CUADRO 9-1

USO DE ADMINISTRACIÓN DE PROYECTOS EN 3M HEALTH CARE

La medicina, lo mismo que la computación, ha recorrido un largo camino en los últimos años. Los avances tanto técnicos como de equipo han logrado que personas antes confinadas a sus casas, ahora puedan llevar una vida activa. En muchos casos esto ha sido posible por el uso de prótesis ortopédicas —coyunturas artificiales y uniones que sustituyen a las originales desgastados por el tiempo o por enfermedades degenerativas—.

3M Health Care Ltd. fabrica implantes ortopédicos desde 1984. El Dr. Phillip Shelley, gerente técnico, comenzó por evaluar sistemas de administración de proyectos con los que pudiera "hacer algo un poco fuera de lo convencional". Ingeniero biomédico por su formación y programador de software por inclinación, Shelley buscaba un sistema rápido y dinámico para programar toda la operación, desde el momento en que los bloques con base de titanio llegan a la fábrica, hasta que se van en forma de prótesis.

La visión de Shelley y sus colegas era programación de recursos finitos, donde cada individuo en la compañía tendría el control de su parte de la operación. Se tendría acceso instantáneo a información crucial sobre la productividad de las máquinas y las líneas de producción. Las corridas de producción se supervisarían de principio a fin, desde una terminal en la planta. Open Plan es el software para administración de proyectos que se seleccionó para esta operación y se introdujo en la planta en 1991.

Con el enfoque de 3M sobre el diseño y la manufactura, el mayor impacto se sintió en la administración de la producción y los recursos. En un año, la compañía lograba terminar casi el 100% del trabajo diario programado, cuando antes sólo lograba un 84%. Se desarrollaban programas hasta con dos meses de anticipación. La producción global se incrementó en 22% y la compañía tiene confianza en que se continuará con esta tasa de crecimiento.

Fuente-. "3M Health Care Boosts Output 22%", *WSTNews*, Welcom Software, 1995. Usado con permiso.

SECCIÓN 4 EJERCICIOS

9.27. ¿Cuál es el propósito principal del control?

9.28. ¿Cuál es la estructura del desglose del trabajo? ¿Por qué se usa? ¿A qué estructura organizacional se parece más?

9.29. Considere el proyecto de construir una nueva planta para un fabricante. Proporcione una estructu ra de desglose del trabajo para este proyecto.

9.30. Considere el ejercicio 9.12. El costo de cada actividad se da en la tabla. Desarrolle las curvas acu muladas de utilización del costo para los programas de inicio cercano y lejano.

Actividad	Costo
1-2	5 000
2-3	12 000
2-4	1000
2-5	500
3-4	2 000
3-6	1200
4-6	600
5-6	3 000

9.31. Después de 15 días, las actividades 1-2,2-3 y 2-5 del ejercicio 9.12 están terminadas. Las activi dades 3-4 y 5-9 pueden comenzar de inmediato. Debido a ciertos problemas, la actividad 2-4 toda vía necesita un día para terminar. Construya una red actualizada para el proyecto.

9.32. Después de 15 días, se han gastado $17 000 en el proyecto del ejercicio 9.31. Utilice los datos de los problemas a que se refiere para desarrollar gráficas del costo actualizado del trabajo desempe ñado y programado. ¿Qué piensa de este proyecto?

9.33. Considere el ejercicio 9.25. El costo de cada actividad se muestra en la tabla. Desarrolle las curvas acumuladas de utilización del costo para los programas de inicio cercano y lejano.

Actividad	Costo (dólares)
A	10 000
B	15 000
C	100 000
D	20 000
E	5 000
F	6 000
G	30 000
H	16 000
I	28 000
J	20 000

9.34. Después de 10 días, las actividades A, B, C y E del proyecto de mantenimiento (ejercicio 9.25) es tán terminadas; D requiere dos días más para terminar, y F, tres días más. Debido a una falla del proveedor, G no puede comenzar hasta dentro de dos días. Construya una red actualizada para el proyecto.

9.35. Después de 10 días, se han gastado $ 157 000 en el proyecto de mantenimiento. Utilice los datos de los problemas anteriores para desarrollar gráficas del costo actualizado del trabajo desempeñado y programado. ¿Qué piensa de este proyecto?

5 ENFOQUE DE PERT PARA LA ADMINISTRACIÓN DE PROYECTOS

Con frecuencia, la suposición de que se puede obtener una sola estimación para la duración de una actividad es poco razonable. En ese caso, para tomar en cuenta la incertidumbre en la duración, se supone que es una variable aleatoria que sigue alguna distribución. La programación y el control prosiguen de la misma manera que con CPM. Sin embargo, en lugar de dar una fecha de terminación del proyecto, se especifica una fecha esperada de terminación del proyecto o la probabilidad de que el proyecto termine en cierta fecha. Este enfoque probabilístico para la administración de proyectos se conoce como **PERT,** siglas en inglés de **técnica de revisión y evaluación de programas** *{Program Evaluation and Review Technique)* (Malcolm *et al.*, 1959). Desafortunadamente, el PERT requiere ciertas suposiciones que no siempre se cumplen.

Existen muchas razones por las que es mejor no especificar una sola duración para una actividad. Es común que los proyectos tengan actividades no repetitivas, puede ser que nunca se haya realizado la actividad y quizá no exista seguridad sobre cuánto tiempo tardará. Si involucra investigación y desarrollo, como sería el caso al introducir un nuevo producto, es difícil prever todos los problemas posibles. En proyectos de construcción, el clima, que siempre es incierto, es un factor primordial en la duración de ciertas actividades. Como resultado, aun cuando se pueda realizar la actividad varias veces, el tiempo que dura puede variar cada vez. Así, las duraciones pueden considerarse variables aleatorias.

5.1 Distribución de la duración de las actividades

Como variable aleatoria, la duración sigue alguna distribución de probabilidad que tiene ciertos parámetros. Los parámetros usados en los cálculos de PERT son la media y la variancia o desviación estándar. En general, tanto la distribución como los parámetros se desconocen, pero es posible que se puedan estimar.

Si no se sabe nada sobre la distribución, puede ser adecuada una distribución uniforme. En lugar de estimar la media y la variancia, que tiene poco significado intuitivo para muchas personas, se estima un intervalo *[a, b]* para la distribución y se calculan la media y la variancia. La **estimación optimista** *a* es la duración de la actividad si todo sale lo mejor posible. Si se pudiera realizar la actividad 100 veces, se haría con esta rapidez sólo una vez. Inversamente, la **estimación pesimista** *b* es el tiempo requerido para realizar la actividad cuando las cosas van tan mal como puede esperarse. De nuevo, debe ocurrir sólo una vez en 100 veces. La estimación de estos tiempos es similar a la estimación de una sola duración. Es decir, deben hacerlo en forma independiente personas que entienden la actividad. Además, no deben considerar casos extremos que rara vez ocurren, como incendios o terremotos, en su estimación pesimista. Con una distribución uniforme, cualquier valor entre el optimista y el pesimista es igualmente probable. La media de distribución uniforme dentro del intervalo *[a, b]* es

$$\mu = (a + b)/2$$

y su variancia es

$$\sigma^2 = (b - a)^2/12$$

Si todos los valores entre los tiempos optimista y pesimista no son igualmente probables, la distribución uniforme no debe usarse. Se puede usar una distribución estándar, como la ñor-

mal; pero en la práctica, las distribuciones de la duración de una actividad casi nunca son simétricas. La distribución triangular es una distribución sesgada. De nuevo, en lugar de estimar la media y la variancia, se pueden usar las estimaciones de los tiempos optimista y pesimista junto con m, el **tiempo más probable,** para calcularlas. El tiempo más probable es la duración que una actividad tarda con más frecuencia si se repite muchas veces. La estimación más probable es equivalente a la moda de la distribución. Con estas tres estimaciones se puede determinar la media y la variancia de una distribución triangular con moda igual a *m*. Esta media está dada por

$$\mu = (a + m + b)/3$$

y la variancia es

$$\sigma^2 = (a^2 + b^2 + m^2 - ab - am - bm)/18$$

Históricamente se ha usado la distribución beta en PERT. Mediante una elección juiciosa de parámetros, la distribución beta puede tomar una gran variedad de formas. Muchas de las distribuciones estándar, como la normal y la uniforme, son casos especiales de la distribución beta. Los parámetros de esta distribución son la media u, la variancia a^2 y dos parámetros de forma k_x y k_2. Si k_x=k_2, la distribución es simétrica y la media y la moda son iguales. Si k_x = k_2 - 1,1a distribución beta es equivalente a una distribución uniforme; conforme los parámetros aumentan, la distribución beta se redondea con un punto medio relativamente alto. Para $k_x = k_2 = 5$, se parece a una distribución normal. Si los dos parámetros son diferentes, la distribución es segada, e invirtiendo los valores se obtiene la imagen de un espejo. Si $k_x < k_2$, la distribución se sesga a la izquierda, es decir, la moda está más cerca de *a* que de *b*, mientras que $k_x > k_2$ la mueve al otro lado. Si $k_x = 2$ y $k_2 = 1$ ($k_x = 1$ y $k_2 = 2$), la distribución beta es equivalente a un triángulo derecho (izquierdo). Un triángulo derecho es simplemente una línea recta desde un valor máximo en *a* a cero en *b*. Si k_x y k_2 son ambos menores que 1, la distribución beta tiene forma de U.

Es difícil estimar la media, la variancia y los parámetros de forma para cada actividad. Se pueden usar las estimaciones de *a, b, m y \x* para calcular los parámetros de forma. Estos son

$$k_1 = \frac{(\mu - a)(2m - a - b)}{(m - \mu)(b - a)}$$

y

$$k_2 = \frac{(b - \mu)}{(\mu - a)} k_1$$

La variancia es

$$\sigma^2 = \frac{k_1 k_2}{(k_1 + k_2)^2 (k_1 + k_2 + 1)}$$

Esto requiere una estimación de la media, que puede ser complicado, ya que tal vez no se disponga de datos históricos. Los creadores de PERT usaron un enfoque de las tres estimaciones usando nada más *a,bym,y* estimando la duración media de la actividad como

$$\mu = \frac{a + 4m + b}{6}$$

y la variancia por

$$\sigma^2 = \frac{(b - a)^2}{36}.$$

Esto funciona, pero restringe la forma de la distribución beta que se obtiene. De hecho los valores de los parámetros de forma son ya sea/:, =3 + V2, k_2 =3 - *4l* k_x =3 - V2, k_2 =3 + V2,o k_x = 4, £$_2$ = 0. En estos casos, la moda real puede no ser igual a m, porque se usaron los tres parámetros para calcular dos incógnitas. El lector interesado puede encontrar detalles en Elmaghraby(1977).

La figura 9-27 contiene las distribuciones uniforme, triangular y beta con el mismo intervalo y modas iguales para la triangular y la beta. Un poco de álgebra muestra que la media de la beta es más cercana a su moda que la de la distribución triangular. Además, la variancia es más pequeña para la beta que para la triangular, que a su vez tiene una variancia menor que la uniforme. Como los cálculos de PERT sólo manejan la media y la variancia, se usa la distribución beta cuando se puede garantizar una variancia más pequeña.

5.2 Análisis probabilístico del tiempo de terminación del proyecto

Como las duraciones de las actividades son variables aleatorias, el tiempo de terminación del proyecto, que es la suma de los tiempos de las actividades en la ruta crítica, también es una variable aleatoria. Como tal, sigue alguna distribución con una media y una variancia. El teorema del límite central establece que cuando el número de variables aleatorias independientes se acerca a infinito, su suma sigue una distribución normal, cuya media y variancia son iguales a la suma de las medias y variancias individuales. Así, la distribución de la longitud del proyecto con frecuencia se supone normal con media y variancia igual a la suma de las medias y variancias de las actividades individuales. Esta suposición es razonable si las distribuciones de las duraciones de las actividades son independientes, si cada duración es despreciable comparada con la suma, y si el número de actividades en la ruta crítica es suficientemente grande. Un análisis completo del teorema del límite central se puede encontrar en Hiñes y Montgomery (1990).

Dada una distribución normal con su media y su variancia para la duración del proyecto, se pueden hacer afirmaciones probabilísticas sobre ella. Por ejemplo, se puede encontrar la probabilidad de que el proyecto lleve más de cierto número de días, o la probabilidad de que termine en alguna fecha establecida. De manera similar, se puede determinar la fecha para la cual existe un 90% de seguridad de que el proyecto termine. Por supuesto, no sólo se pueden hacer afirmaciones sobre la duración del proyecto; se pueden hacer afirmaciones similares sobre cualquier evento, incluyendo los indicadores. También se pueden proporcionar intervalos de confianza para estos tiempos. Vea en la sección 5.3 un análisis de las limitaciones de este enfoque. Ahora se ilustra el PERT con un ejemplo.

Ejemplo 9-9. Modelo PERT para LJ9000. De nuevo observe el proyecto de la impresora LJ9000. Lynn ha evaluado todas las actividades y ha determinado las estimaciones optimista, más probable y pesimista para cada una. Estos datos se usan para calcular la media y la variancia con el enfoque beta de tres estimaciones. Los resultados se dan en la tabla 9-8. Para obtener la media de 1-2, se establece

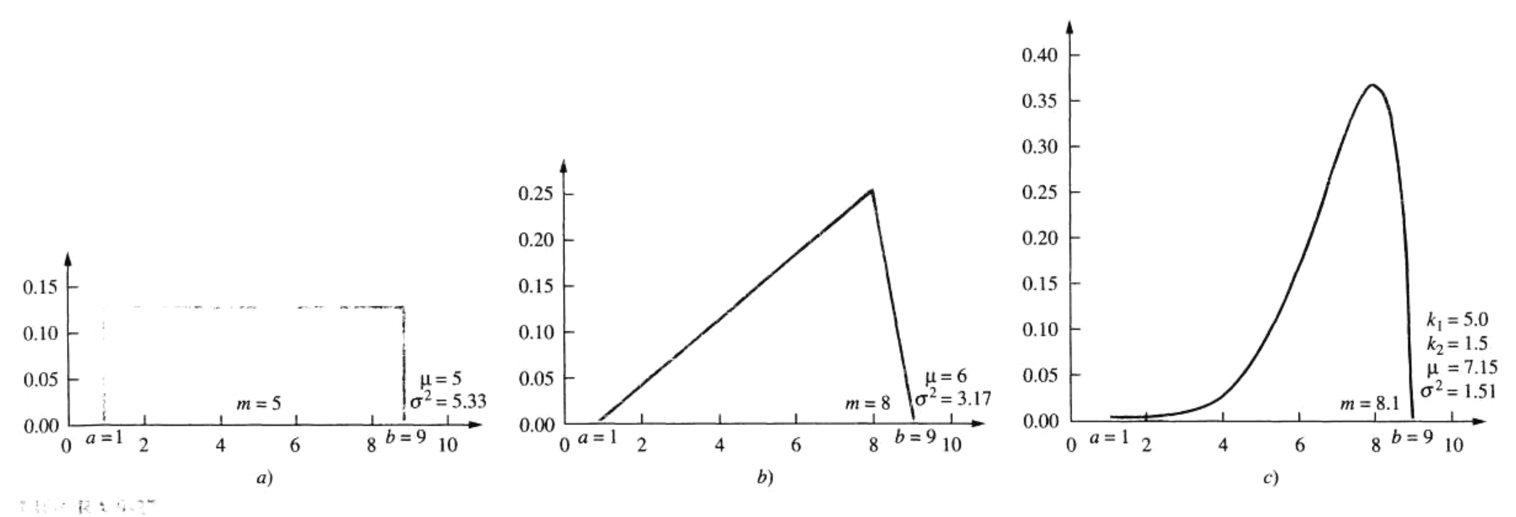
$$\mu = (a + 4m + b)/6 = (1 + 4 \times 2 + 4)/6 = 2.17$$

y

$$\sigma^2 = (b - a)^2/36 = (4 - 1)^2/36 = 0.25$$

El resto de las actividades se calculan y se muestran en la tabla 9-8.

Se quiere examinar la duración del proyecto dada la distribución de cada actividad. Se hacen de nuevo los cálculos del CPM usando las duraciones medias. Los resultados se dan en la tabla 9-9.



Algunas distribuciones posibles para la duración de las actividades: *a*) uniforme, *b*) triangular, *c*) beta

TABLA 9-8
Datos de duración nara LJ9000

i-j	*a*	*m*	*b*	μ	σ^2
1-2	1	2	4	2.17	0.25
2-3	1	3	5	3.00	0.44
2-4	2	5	9	5.17	1.36
3-5	3	4	5	4.00	0.11
3-6	1	1	1	1.00	0.00
4-6	4	6	12	6.67	1.77
4-7	2	2	3	2.17	0.03
5-8	4	8	14	8.33	2.78
6-8	6	7	10	7.33	0.44
7-8	2	4	6	4.00	0.44

Observe que las actividades se ordenan según su holgura, y las actividades críticas aparecen primero. Para cada actividad, se dan los tiempos de inicio y terminación cercanos y lejanos basados en los tiempos esperados, junto con la variancia.

La ruta crítica es 1 -2,2-4,4-6 y 6-8 y, por el teorema del límite central, la longitud esperada es

$$\mu = 2.17 + 5.17 + 6.67 + 7.33 = 21.33 \text{ semanas}$$

La variancia para la trayectoria es la suma de las variancias, es decir,

$$\sigma^2 = 0.25 + 1.36 \text{ -f } 1.77 + 0.44 = 3.82$$

Observe que el tiempo medio para las actividades es diferente que en el caso determinístico, lo que hace que la duración de la ruta crítica cambie.

De la suposición de normalidad, se pueden usar la media y la desviación estándar de la trayectoria para calcular el tiempo esperado de terminación del proyecto y la probabilidad de que termine en un número de semanas dado. La probabilidad de que el proyecto termine en *T* semanas es

$$P\{E_8 \leq T\} = P\left\{z \leq \frac{(T-\mu)}{\sigma}\right\}$$

Por ejemplo, usando la tabla A-1, la probabilidad de que el proyecto termine en 20 semanas es

$$P\{E_8 \leq 20\} = P\left\{z \leq \frac{(20-21.33)}{1.95}\right\} = P\{z \leq -0.68\} = 0.25$$

Una manera instructiva de ver el tiempo de terminación del proyecto es construir una gráfica de tiempo contra la probabilidad acumulada de la terminación. La figura 9-28 muestra el tiempo de ter-

TABLA 9-9
Cálculo de CPM para LJ9O00 usando datos probubilísticos

i-j	μ_{i-j}	σ_{i-j}	ES_{i-j}	LS_{i-j}	EF_{i-j}	LF_{i-j}	S_{i-j}
1-2	2.17	0.50	0.00	0.00	2.17	2.17	0.00
2-4	5.17	1.17	2.17	2.17	7.33	7.33	0.00
4-6	6.67	1.33	7.33	7.33	14.00	14.00	0.00
6-8	7.33	0.67	14.00	14.00	21.33	21.33	0.00
2-3	3.00	0.67	2.17	6.00	5.17	9.00	3.83
3-5	4.00	0.33	5.17	9.00	9.17	13.00	3.83
5-8	8.33	1.67	9.17	13.00	17.50	21.33	3.83
3-6	1.00	0.00	5.17	13.00	6.17	14.00	7.83
4-7	2.17	0.17	7.33	15.17	9.50	17.33	7.83
7-8	4.00	0.67	9.50	17.33	13.50	21.33	7.83

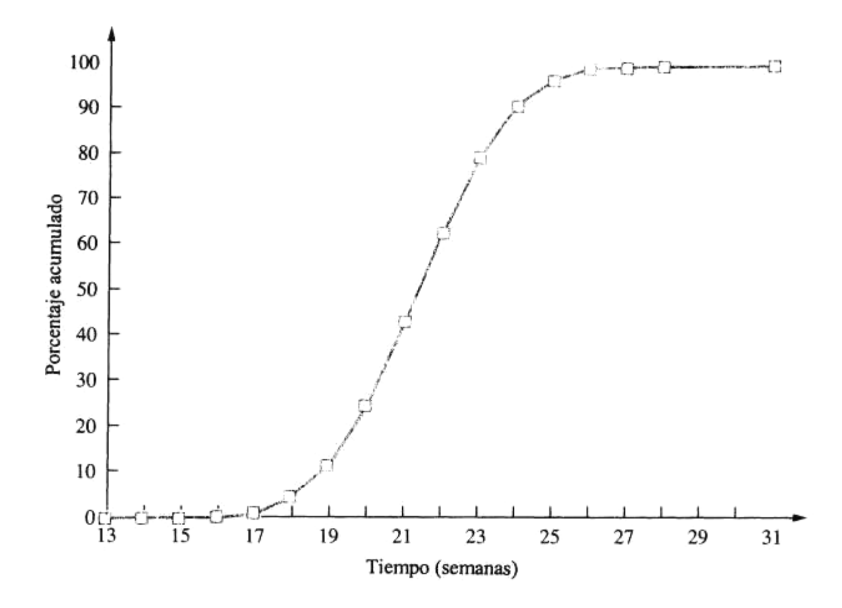


FIGURA 9.2.8
Probabilidad contra tiempo de terminación del proyecto LJ9000

minación de la impresora LJ9000 contra el porcentaje acumulado de terminación. Estos valores se obtienen usando el mismo enfoque que para la probabilidad de terminar en 20 semanas. Esta gráfica proporciona una mejor perspectiva de la probabilidad de terminar el proyecto en un tiempo específico. Por ejemplo, terminar en 25 semanas parece bastante probable, mientras que terminar en menos de 18 semanas parece muy poco probable.

5.3 Limitaciones de PERT

Debe tenerse cuidado con los resultados obtenidos por el PERT. Aunque las suposiciones requeridas para usar el teorema del límite central no se cumplen estrictamente en muchos casos, el teorema es robusto y no debe causar un error grande. Si existe una sola ruta crítica, la variancia de la trayectoria es pequeña, y ninguna otra trayectoria con variancia mayor se acerca en duración; de nuevo, los resultados deben ser exactos.

Sin embargo, si hay varias trayectorias con longitudes cercanas a la media de la ruta crítica, debe tenerse cuidado, en particular si una o más de ellas tiene variancia grande. La longitud del proyecto de hecho es la longitud de la ruta más larga, entonces la verdadera distribución de la duración del proyecto es en realidad el máximo de varias variables aleatorias, una para cada trayectoria en la red. El máximo de varias variables normales no sigue una distribución normal, lo cual puede crear un problema. Los cálculos propuestos por PERT en realidad tienden a subestimar la duración del proyecto y a sobrestimar la probabilidad de terminar el proyecto en un tiempo específico.

Esto se conoce como el problema de sesgo del evento de fusión. Para la mayor parte de los proyectos no es un problema serio, porque no se requiere una exactitud extrema. Al usar el enfoque de tres estimaciones para la distribución beta se puede magnificar el problema. Se pueden encontrar los detalles sobre cómo rectificar este problema en Elmaghraby (1977). Una

alternativa al PERT es la simulación de la red del proyecto para varias realizaciones de las duraciones y el desarrollo de una distribución empírica para la terminación del proyecto.

SECCIÓN 5 EJERCICIOS

9.36. Explique la diferencia entre PERT y CPM.

9-37. ¿Por qué es común usar la distribución beta en los cálculos de PERT? ¿En qué difiere el uso de una distribución triangular? ¿Y una distribución uniforme?

9.38. ¿Qué suposiciones se necesitan para usar PERT? ¿Qué limitaciones causan?

9.39. Un proyecto se compone de siete actividades etiquetadas A, B,..., G. Las precedencias y las esti maciones optimista, más probable y pesimista de las duraciones se presentan en la tabla.

		Duración (semanas)		
Actividad	**Precedencia**	**Optimista**	**Más probable**	**Pesimista**
A	D	1	1	7
B	E	1	4	7
C	F	*2*	*2*	8
D	G	1	1	1
E	G	2	5	14
F	—	2	5	8
G	—	3	6	15

a) Dibuje la red del proyecto

b) Utilice la distribución beta para encontrar la duración esperada y la variancia de cada acti vidad.

c) Realice los cálculos de las pasadas hacia adelante y hacia atrás para el proyecto.

d) ¿Cuál es la duración esperada del proyecto y su variancia?

é) Encuentre la holgura total para cada actividad.

/) Encuentre la probabilidad de que el proyecto termine:

i) tres semanas antes de la terminación esperada

ii) tres semanas después de la terminación esperada *g)* Se prometió al cliente entregar el proyecto en 18 semanas. ¿Cuál es la probabilidad de ser tardío?

h) ¿Qué tiempo de terminación del proyecto tiene 90% de oportunidad de lograrse? i) ¿Cuál es la probabilidad de que la actividad D esté terminada para el tiempo 4? *j)* ¿Qué efecto tendría suponer una distribución triangular sobre la terminación esperada del proyecto y la variancia?

k) Desarrolle una gráfica de la probabilidad contra el tiempo de terminación.

9.40. Un proyecto se compone de cuatro actividades etiquetadas A, B, C y D. Las precedencias y las estimaciones optimista, más probable y pesimista de las duraciones se presentan en la tabla.

		Duración (semanas)		
Actividad	**Precedencia**	**Optimista**	**Más probable**	**Pesimista**
A	C	10	10	10
B	D	1	9	11
C	—	10	10	10
D	—	1	9	11

a) Dibuje la red del proyecto.
b) Utilice la distribución beta para encontrar la duración esperada y la variancia de cada acti vidad.
c) Realice los cálculos de las pasadas hacia adelante y hacia atrás para el proyecto.
d) ¿Cuál es la duración esperada del proyecto y su variancia?
e) ¿Piensa que las suposiciones de PERT son razonables para este proyecto? Explique. /) ¿Qué efecto tendría suponer una distribución triangular sobre la terminación esperada del proyecto y la variancia? ¿Qué pasa con las suposiciones de PERT?

9.41. Una sola actividad tiene duración esperada de \x e intervalo *(b-á).* Esta actividad se compone de tres subactividades en secuencia, cada una con duración esperada de (i/3. El intervalo total también es *(b-a).* ¿Cuál es la estimación de la variancia para completar la actividad si se maneja como una actividad en lugar de dividirla en tres actividades? ¿Qué suposiciones hizo? ¿Qué implicaciones tiene esto para PERT?

6 RECURSOS LIMITADOS

Hasta ahora se ha ignorado cualquier recurso que pueda ser necesario para llevar a cabo la actividad. Esto con frecuencia es poco realista. Por ejemplo, al diseñar una impresora, algunas actividades requieren un ingeniero electrónico y, en la construcción de una casa, se necesitan uno o más carpinteros. Los recursos se clasifican como renovables o no renovables. Las personas son un buen ejemplo de **recursos renovables;** una persona que trabaja hoy está disponible para trabajar mañana. El material es un **recurso no renovable.** Al construir una casa, si hoy se colocan unos clavos, esos mismos clavos no podrán usarse después. La atención se centra en los recursos renovables, ya que los materiales por lo general se pueden procurar en cantidades adecuadas y proporcionarse en el momento apropiado. La estimación del uso de recursos para cada actividad es similar a la estimación de las duraciones. Para facilidad de discusión, se considera un solo recurso renovable.

Si se cuenta con una cantidad ilimitada de un recurso, su único impacto es añadir complejidad a la planeación, supervisión y control del proyecto. Sin embargo, si el recurso es limitado, tiene un impacto mayor. CPM supone que dos actividades pueden llevarse a cabo al mismo tiempo siempre que se respeten las precedencias. Con recursos limitados esto ya no es cierto. Si dos actividades requieren más recursos totales que los disponibles, entonces no pueden ocurrir al mismo tiempo y una de ellas debe retrasarse. El retraso puede ser tan largo como para causar que todo el proyecto termine tarde. Así, un programa que satisface las restricciones de recursos limitados puede tener diferentes holguras y ruta crítica que el mismo proyecto que los ignora. Esto también puede dar como resultado programas de inicio cercano y lejano no únicos.

Cuando los recursos están limitados, se puede estar frente a dos metas distintas. La situación que se encuentra con más frecuencia tiene una cantidad específica de recursos disponible durante el proyecto. Así, se quiere terminar el proyecto lo más pronto posible y en ningún momento usar más recursos que los disponibles. Esto recibe el nombre de problema **restringido por los recursos.** Un ejemplo sería el desarrollo de un paquete de software, en el que cada actividad requiere un número específico de programadores, y se dispone de un número fijo de ellos, quienes comparten todas las actividades.

La segunda situación es una reserva ilimitada de recursos, pero se desea usar la misma cantidad todo el tiempo. Esto se llama problema con **recursos nivelados.** Al construir una casa se necesitan albañiles (trabajadores no calificados que es sencillo contratar). En lugar de pro-

gramar el trabajo de manera que un día se requieren 100 trabajadores y el siguiente 20, sería mejor que todos los días se usara el mismo número. Este principio también se aplica a los recursos no renovables, por ejemplo, puede ser deseable abastecer de materiales a una tasa estable.

Ambos problemas son *NP-duros* (vea el cuadro 8-1) y en extremo difíciles de resolver en forma óptima. Una solución garantizada como la "mejor" para cualquiera de los dos, en apariencia requiere alguna forma de enumeración total de las situaciones posibles y sólo se puede obtener una solución óptima en problemas pequeños. Aunque existen muchos esquemas ingeniosos de enumeración (como ramificación y acotamiento y programación dinámica), obtener una respuesta óptima para problemas con 100 actividades y cinco recursos puede tomar siglos en la computadora más rápida de la actualidad. Por lo tanto, se ve la conveniencia de aceptar una buena solución en lugar de intentar obtener la mejor respuesta. Esto se logra mediante procedimientos heurísticos que no garantizan soluciones óptimas, pero que son sencillos y con frecuencia dan soluciones cercanas a la óptima.

6.1 Enfoques gráficos

Para la planeación básica, todo lo que se necesita son los enfoques gráficos. La herramienta que más se usa para considerar los recursos es el **perfil de recursos,** algunas veces llamado **perfil de carga** o **gráfica de panorama.** Una simple gráfica de la utilización de recursos contra el tiempo para un programa específico, resulta una manera conveniente para ver cuándo se usan menos o más recursos de los que se tienen. Un ejemplo sencillo ilustra el perfil de recursos.

Ejemplo 9-10. Perfil de recursos para la LJ900. El proyecto LJ9000 requiere ingenieros electrónicos para algunas actividades. Se han asignado cuatro al proyecto, y Lynn quiere saber si el proyecto puede terminar en 20 semanas con los cuatro ingenieros o si necesita más. La tabla 9-10 presenta el número de ingenieros electrónicos para cada actividad.

Dado un programa, calcule el número de ingenieros electrónicos necesarios en cualquier punto en el tiempo. Éste es la suma de todos los ingenieros que usan las actividades en proceso en un tiempo dado. Por ejemplo, en el programa de inicio cercano (vea la figura 9-29), la actividad 1-2 es la única en marcha del tiempo cero al final de la semana 1, durante este tiempo se necesitan 2 ingenieros electrónicos. Como las actividades 2-3 y 2-4 comienzan en la semana 2, se necesitan ingenieros para las dos; esto es, 1 + 2 = 3 se usan desde el principio de la semana 2 hasta el principio de la semana 5, momento en el cual 2-3 termina. Continuando de esta manera, se puede determinar el número de ingenieros electrónicos necesarios para cada semana del programa de inicio cercano. Después se puede graficar el número contra el tiempo, como se muestra en la figura 9-29a).

En la figura, cada rectángulo representa una actividad. Su altura representa el número de ingenieros necesarios para la actividad y su longitud el tiempo requerido para hacerla. Las actividades que no usan ingenieros electrónicos se omiten. Cuando es posible, se representa una actividad con un cuadro; la actividad 3-5 tiene que dividirse en dos cuadros a menos que se divida la actividad 4-6. La línea punteada en 4 ingenieros marca el número disponible para el proyecto. Si el programa necesita más, la gráfica será más alta que la línea punteada. Esto ocurre en las semanas 7 y 8, cuando son necesarios 5 ingenieros. El programa de inicio cercano no es factible en cuanto a recursos.

TABLA 9-10 ingenieros electrónicos necesarios para el LJ9000

i-j	**1-2**	**2-3**	**2-4**	**3-5**	**3-6**	**4-6**	**4-7**	**5-8**	**6-8**	**7-8**
IE	**2**	**1**	**2**	**1**	**0**	**3**	**1**	**0**	**3**	**0**

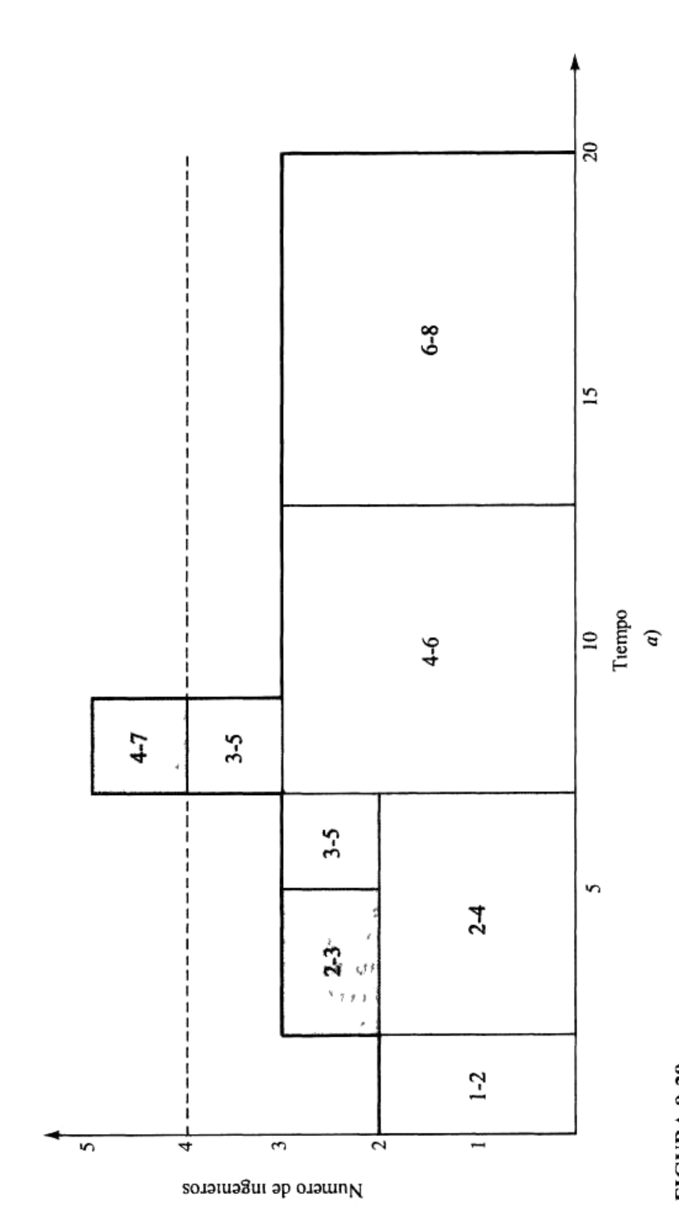


FIGURA 9-29
Perfil de recusos para el proyecto LJ9000 *a*) programa de inicio

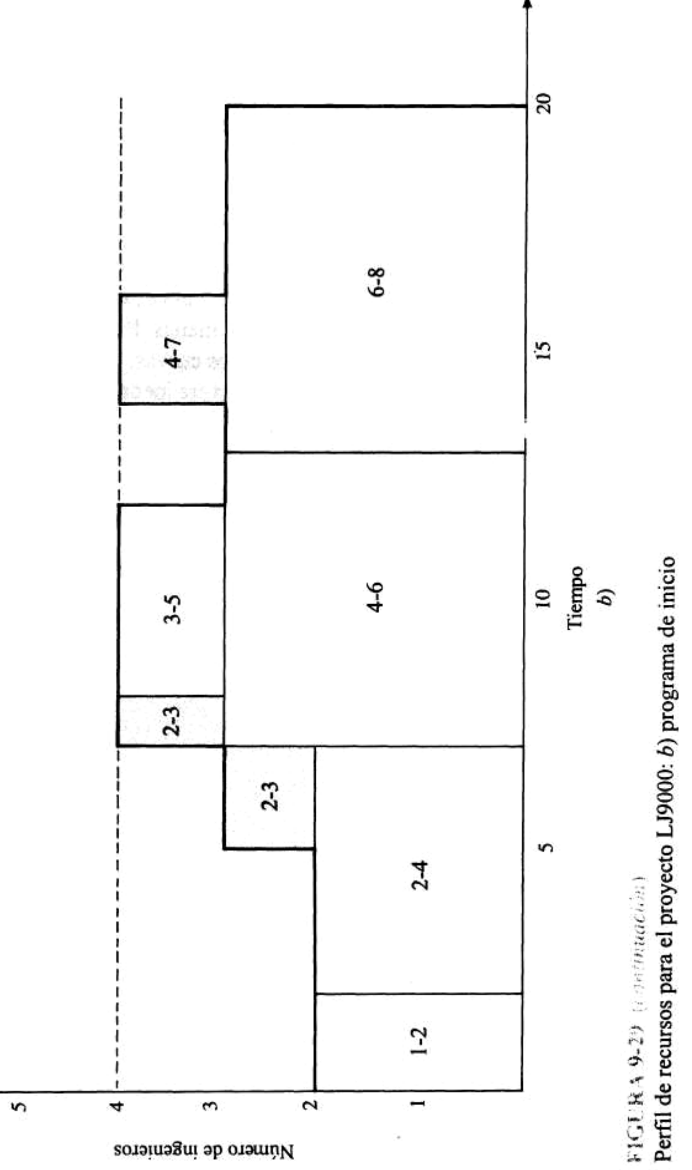


FIGURA 9-29 (continuación)
Perfil de recursos para el proyecto LJ9000: b) programa de inicio

Es sencillo crear un programa factible en recursos para el proyecto LJ9000; simplemente se retrasa la actividad 4-7, que precede a la 7-8; estas dos actividades tienen holgura y la 7-8 no necesita el recurso, por lo que parece posible el retraso. De hecho, el programa de inicio lejano, dado en la figura 9-296) es factible en recursos. En general, construir un programa factible en recursos no es una tarea fácil.

Una manera distinta de examinar los requerimientos de recursos es la **gráfica de requerimientos de recursos acumulada,** que representa el uso acumulado de recursos contra el tiempo. El uso acumulado de recursos es la suma de la utilización de un recurso en el perfil, desde el principio del proyecto hasta el tiempo actual. La figura 9-30 es una gráfica acumulada de los requerimientos de recursos del número de ingenieros electrónicos que necesita el proyecto LJ9000, para programas de inicio cercano y lejano. El total acumulado de 62 ingenieros es la necesidad de cualquiera de ellos. Para este ejemplo, los programas son idénticos en las dos primeras y en las cuatro últimas semanas. Para cualquier programa, la utilización acumulada del recurso debe estar entre estas dos curvas. Si no es así, el proyecto está adelantado o atrasado, o la estimación del uso de recursos era incorrecta. Si el uso real está por encima de la curva de inicio cercano, el proyecto está adelantado o los requerimientos se subestimaron. Un uso real por debajo de la curva de inicio lejano implica lo contrario.

Otra herramienta útil en la planeación es el **índice crítico** (IC), que es la razón del requerimiento promedio de recursos por unidad de tiempo entre la disponibilidad del recurso por uni-

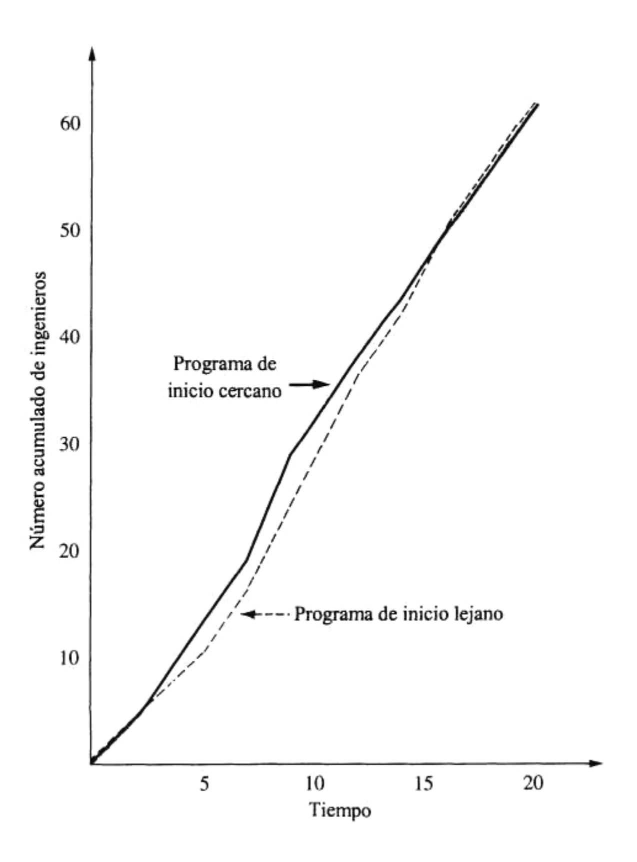


FIGURA 9-30
Perfil acumulado de recursos

dad de tiempo. La utilización promedio se calcula a partir de los datos acumulados del recurso; se divide el requerimiento total acumulado del recurso entre la duración del proyecto. Para el ejemplo de la LJ900, el requerimiento total es 62 y la duración es 20 semanas, entonces el uso promedio semanal es 3.1 ingenieros electrónicos. Si se tienen 4 ingenieros disponibles cada semana, entonces

$$IC = 3.1/4 = 0.775 \qquad \text{o} \qquad 77.5\%$$

IC es la utilización promedio del recurso si se usa la misma cantidad cada periodo. Si se usan exactamente 3.1 ingenieros electrónicos cada semana, el proyecto se puede realizar en 20 semanas. Como se dispone de cuatro ingenieros electrónicos, se pueden usar más que el promedio en algunos periodos y, en teoría, terminar el proyecto a tiempo.

Si IC < 1, es posible completar el proyecto a tiempo. La estructura de precedencias puede forzar a que el uso del recurso en algún periodo sea menor que el promedio, de manera que aun cuando IC < 1, la terminación a tiempo puede ser imposible. Cuanto más pequeña sea IC, más probable es, en promedio, que el proyecto termine a tiempo.

Si IC = 1, deben usarse justo los recursos disponibles cada periodo para que el proyecto termine a tiempo, es decir, la utilización perfecta. Si las precedencias o los requerimientos de las actividades fuerzan a usar más o menos en un periodo, el proyecto se retrasará.

Si IC > 1, el proyecto tomará más tiempo. De hecho, debe tomar al menos (IC - 1) x 100% más tiempo. Esto supone la utilización perfecta del recurso disponible; si esta utilización es imposible, el proyecto se retrasa todavía más. Si sólo se cuenta con tres ingenieros electrónicos, entonces IC = 3.1/3 = 1.03, y el proyecto debe tomar al menos (1.03 - 1) x 100 = 3% más tiempo o 20.6 semanas en total.

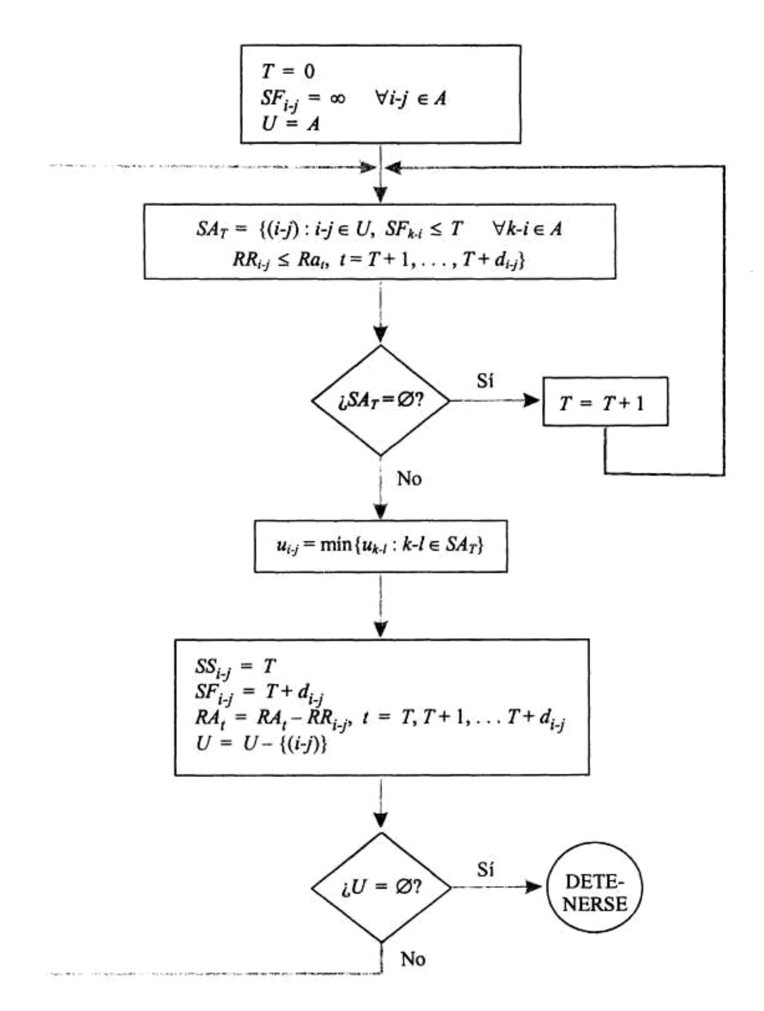
Cuando el índice crítico es pequeño, digamos 0.65, las limitaciones de recursos no deben causar muchos problemas. Sin embargo, los valores más grandes indican que debe tenerse cuidado al programar las actividades para que los recursos se usen lo mejor posible. Un heurístico para programar con recursos limitados puede ser útil.

6.2 Límites fijos de recursos

Cuando se programa con recursos limitados, el objetivo común es minimizar la duración del proyecto sin exceder la disponibilidad de recursos en ningún momento. Primero se define la notación. Sea

A = conjunto de actividades en la red
$RR_{i\text{-}j}$ = requerimiento del recurso de la actividad *i-j*, que se necesita constantemente en toda la duración de la actividad
RA_t = cantidad de recurso disponible en el tiempo *t*
$u_{i\text{-}j}$ = alguna medida de urgencia o prioridad de la actividad *i-j*
t y *T* = contadores de tiempo
U = conjunto de actividades no programadas
SA_T = conjunto de todas las actividades que pueden comenzar en el tiempo *T*
$SS_{i\text{-}j}$ = tiempo de inicio programado para la actividad *i-j*
$SF_{i\text{-}j}$ = tiempo de terminación programado para la actividad *i-j*

Para que exista un programa factible de recursos, $RR_{i\text{-}j} \leq RA_t$ para toda actividad *i-j* y todo tiempo *t*.



Algoritmo heurístico para proyectos con limitaciones de recursos

El enfoque es construir un programa que satisfaga las limitaciones de recursos. La figura 9-31 es un diagrama de flujo del algoritmo. Inicialmente, se establece el tiempo actual *T* - O y todos los tiempos de terminación del programa se igualan a infinito. Sean los trabajos no programados, todas las actividades en la red. SA_T es el conjunto de actividades programables en el tiempo *T.* Para ser un miembro del conjunto, la actividad no debe estar programada. Más aún, todos sus predecesores deben estar terminados en el tiempo *T*, de manera que su terminación programada debe ser igual o menor que *T.* (El nodo 1 es el nodo inicial, entonces la actividad 1 *-j* no tiene predecesores, es decir, la actividad *k-l* no existe y por lo tanto satisface esta condición.) Por último, el recurso disponible en cada unidad de tiempo desde *T* hasta la terminación de *i-j* debe ser suficiente para realizar *i-j.* Si estas condiciones se cumplen, la actividad se incluye en el conjunto de actividades programables.

Si no hay actividades en el conjunto programable, se incrementa *T* y se forma un conjunto programable para el nuevo tiempo; se continúa hasta que llega un tiempo con al menos una actividad en el conjunto programable. Se elige *i-j*, la actividad más urgente en el conjunto progra-

mable. Existen muchas medida de urgencia, por ejemplo, la holgura y el tiempo de inicio cercano.

Se programa la actividad *i-j* para comenzar en el tiempo *T* y terminar en el tiempo $T + d$-. Para cada periodo que la actividad está en proceso, se reduce el recurso disponible en la cantidad que usa esa actividad. Se elimina *i-j* del conjunto programable.

Si el conjunto de actividades no programadas ya no tiene actividades, el algoritmo termina. El tiempo de terminación del proyecto es el tiempo de terminación programado más grande para cualquier actividad. Si tienen que programarse más actividades, se actualiza el conjunto de actividades programables. Éste puede cambiar debido al incremento en el uso del recurso por una actividad que se realiza o porque disminuyó al terminar una actividad o un predecesor.

La clave de este procedimiento es la elección de la siguiente actividad que debe programarse. Si sólo una actividad es elegible, entonces se programa. Si hay varias actividades en el conjunto programable, la elección afecta el programa generado. Existen muchas reglas para elegir actividades. Los estudios empíricos indican que la holgura más pequeña primero o el menor tiempo de terminación lejana primero, por lo general, resultan en terminaciones del proyecto más cortas. El procedimiento se ilustra con un ejemplo.

Ejemplo 9-11. Programa heurístico para la LJ9000. Después de observar el perfil de recursos de ingenieros electrónicos para los programas de inicio cercano y lejano, Lynn se pregunta cuánto se retrasaría el proyecto si sólo dispusiera de tres ingenieros. El índice crítico de 3.1 indica que el proyecto no puede realizarse en 20 semanas con sólo tres ingenieros electrónicos, pero ella desea saber cuánto tiempo adicional necesitaría. Para averiguarlo, utiliza el heurístico para restricción de recursos. Como medida de urgencia, usa el inicio cercano; rompe los empates con la actividad de holgura más pequeña. Por conveniencia, las actividades, duraciones y requerimientos de recursos se dan en la tabla 9-11. Las actividades 3-6, 5-8 y 7-8 no requieren ingenieros electrónicos, de manera que se pueden programar independientemente de las otras actividades. Se desea construir un programa con restricción de recursos que termine lo más pronto posible.

TABLA 9-11
Datos de duración y recursos para la LJ9000

i-j	1-2	2-3	2-4	3-5	3-6	4-6	4-7	5-8	6-8	7-8
$d_{i\text{-}j}$	2	3	5	4	1	6	2	8	7	4
$RR_{i\text{-}j}$	2	1	2	1	0	3	1	0	3	0

Se establece $T = 0$, $SF_{i\text{-}j} = \infty$ para todas las actividades *i-j* y $U = \{1\text{-}2, 2\text{-}3, 2\text{-}4, 3\text{-}5, 4\text{-}7, 4\text{-}6, 6\text{-}8\}$. El recurso disponible, RA_T, es 3 para todos los periodos. Ahora se determina SA_0.

Todas las actividades en *U* son posibles miembros de SA_0. La actividad 1-2 no tiene predecesor incompleto, así que puede comenzar ahora. Se cuenta con más recursos que los que 1-2 requiere ($RR_{1\text{-}2} = 2 \leq 3 = RA_0 = RA_1$), por lo que 1-2 es la única actividad programable; $SA_0 = \{1\text{-}2\}$. Como SA_0 no es vacío, se programa una actividad. Ya que sólo hay una actividad en SA_0, ésta es la que se programa. Sea

$$SS_{1\text{-}2} = T = 0$$

$$SF_{1\text{-}2} = T + d_{1\text{-}2} = 0 + 2 = 2$$

$$RA_0 = RA_0 - RR_{1\text{-}2} = 3 - 2 = 1$$

$$RA_1 = RA_1 - RR_{1\text{-}2} = 3 - 2 = 1$$

$$U = U - \{1\text{-}2\} = \{2\text{-}3, 2\text{-}4, 3\text{-}5, 4\text{-}7, 4\text{-}6, 6\text{-}8\}$$

Existen actividades en *U*, por lo que se determina un nuevo SA_0.

Ninguna actividad en U tiene sus predecesores terminados, entonces $SA_0 = \varnothing$. Se hace $T = T + 1 = 1$ y se determina SA_1. De nuevo, $SA_1 = \varnothing$, entonces $T = T + 1 = 2$. En $T = 2$, termina 1-2 y ahora las actividades 2-3 y 2-4 tienen sus predecesores terminados:

$$SF_{1\text{-}2} = 2 \leq 2 = T$$

Todavía más,

$$RR_{2\text{-}3} = 1 \leq 3 = RA_2 = RA_3 = RA_4$$

implica que existen suficientes recursos para programar 2-3, de manera que está en el conjunto programable. De manera similar, 2-4 también es programable, entonces $SA_2 = \{2\text{-}3, 2\text{-}4\}$.

Como $SA_2 \neq \varnothing$, se programa una actividad. Se tiene más de una en el conjunto, por lo que se elige la más urgente. La urgencia se define como el inicio cercano, y de los cálculos de CPM se tiene $ES_{2\text{-}3} = ES_{2\text{-}4} = 2$; el empate se rompe por la menor holgura. De nuevo, de los cálculos de CPM, se tiene $S_{2\text{-}3} = 3$ y $S_{2\text{-}4} = 0$, y se programa la actividad 2-4. Para programarla, se hace

$$SS_{2\text{-}4} = T = 2$$
$$SF_{2\text{-}4} = T + d_{2\text{-}4} = 2 + 5 = 7$$

T	RA_T	U	SA_T	i-j	$SS_{i\text{-}j}$	$SF_{i\text{-}j}$	RR_T	RA_T
0	3	1-2, 2-3, 2-4, 3-5, 4-7, 4-6, 6-8	1-2	1-2	0	2	2	1
1	1	2-3, 2-4, 3-5, 4-7, 4-6, 6-8	∅					1
2	3	2-3, 2-4, 3-5, 4-7, 4-6, 6-8	2-3, 2-4	2-4	2	7	2	1
2	1	2-3, 3-5, 4-7, 4-6, 6-8	2-3	2-3	2	5	1	0
3	0	3-5, 4-7, 4-6, 6-8	∅					0
4	0	3-5, 4-7, 4-6, 6-8	∅					0
5	1	3-5, 4-7, 4-6, 6-8	3-5	3-5	5	9	1	0
6	0	4-7, 4-6, 6-8	∅					0
7	2	4-7, 4-6, 6-8	4-7	4-7	7	9	1	1
8	1	4-6, 6-8	∅					1
9	3	4-6, 6-8	4-6	4-6	9	15	3	0
10	0	6-8	∅					0
11	0	6-8	∅					0
12	0	6-8	∅					0
13	0	6-8	∅					0
14	0	6-8	∅					0
15	3	6-8	6-8	6-8	15	22	3	0
15	0	∅						0

$RA_2 = RA_2 - RR_{2\text{-}4} = 3 - 2 = 1$
$RA_3 = RA_3 - RR_{2\text{-}4} = 3 - 2 = 1$
$RA_4 = RA_4 - RR_{2\text{-}4} = 3 - 2 = 1$
$RA_5 = RA_5 - RR_{2\text{-}4} = 3 - 2 = 1$
$RA_6 = RA_6 - RR_{2\text{-}4} = 3 - 2 = 1$
$U = U - \{2\text{-}4\} = \{2\text{-}3, 3\text{-}5, 4\text{-}7, 4\text{-}6, 6\text{-}8\}$

Como hay actividades en t/, se determina un nuevo SA_2. El resto de los cálculos se resumen en la tabla 9-12. El programa generado por el algoritmo se muestra en la figura 9-32. El tiempo de terminación del proyecto aumenta a 32 semanas, cuando sólo se dispone de tres ingenieros electrónicos.

Puede valer la pena generar varios programas usando diferentes reglas. Aunque las reglas de holgura y terminación lejana casi siempre funcionan mejor, otras reglas pueden producir mejores programas para algunos problemas. Como es relativamente sencillo correr este procedimiento en una computadora, puede usarse una gran variedad de reglas e implantar el mejor programa entre los que resultan. Se pueden considerar otras reglas para elegir la actividad, como el menor uso del recurso, la duración más pequeña, la duración más larga o la que tiene más actividades sucesoras. Se puede encontrar una descripción detallada de otras reglas y otros enfoques en Olaguibel y Goerlich (1989).

6.3 Otros aspectos

En las situaciones de nivelación de recursos, el objetivo es suavizar el uso de recursos durante la vida útil del proyecto. Las actividades no críticas pueden comenzar en cualquier momento entre su tiempo de inicio cercano y lejano sin afectar la terminación del proyecto. Así, la estrategia general es cambiar los tiempos de inicio de las actividades no críticas dentro de ese intervalo, de manera que el uso del recurso se distribuya más parejo. En proyectos pequeños, esto se puede hacer por prueba y error de manera visual, usando los perfiles del recurso o gráficas de Gantt. En proyectos más grandes, se requiere un método más formal; vea Slowinski y Weglarz (1989) o Morton y Pentico (1993).

El análisis de este capítulo supuso que se tiene sólo un recurso que las actividades requieren. Con mucha frecuencia, se manejan múltiples recursos y tanto los requerimientos como la disponibilidad puede variar con el tiempo. Conceptualmente, esto no causa problemas, puesto que los enfoques todavía son válidos. Sin embargo, debe verificarse la disponibilidad de todos

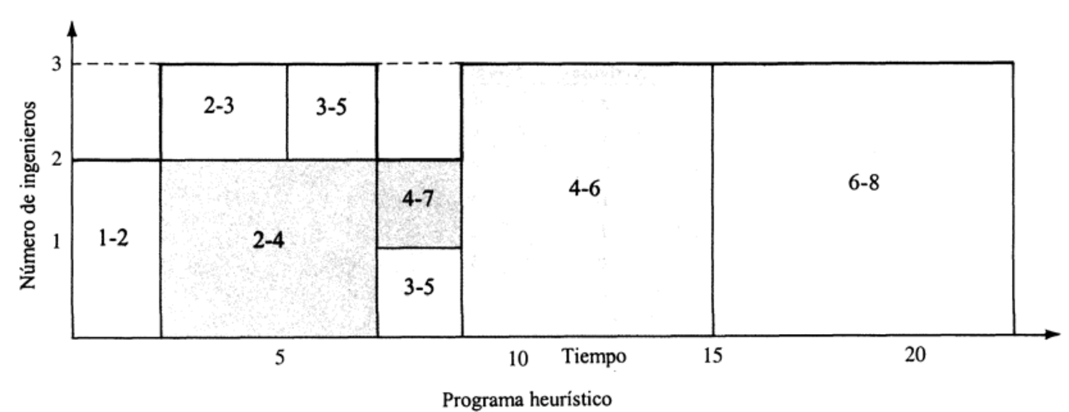


FIGURA 9-32. Perfil del recurso para el programa heurístico

los recursos requeridos por la actividad. Esto, sin duda, agrega complejidad al problema. En general, las soluciones producidas por los algoritmos heurísticos no son tan buenas cuando se tienen que considerar más recursos.

Muchas veces, varios proyectos están en marcha al mismo tiempo. Estos proyectos pueden manejarse de manera independiente a menos que compartan recursos. De nuevo, no hay problemas conceptuales en esto, pero sí se requiere cuidado al elegir la actividad que sigue en la programación. Por ejemplo, elegir la actividad con la holgura más grande puede ya no ser suficiente, ya que la holgura de actividades de diferentes proyectos puede no ser comparable.

Muchos algoritmos generales, como la simulación de recocido y los algoritmos genéticos se han adaptado para la programación de proyectos con restricción de recursos. Slowinski y Weglarz (1989) proporcionan un resumen de algunos resultados, y se pueden encontrar muchos en la literatura sobre el tema.

SECCIÓN 6 EJERCICIOS

9.42. Utilice los tiempos y los requerimientos de recursos de la siguiente tabla con la red del ejercicio 9.12.

Actividad	Tiempo	Recurso	Actividad	Tiempo	Recurso
1-2	6	6	3-4	3	3
2-3	3	2	3-6	4	2
2-4	2	3	4-6	3	2
2-5	2	2	5-6	7	2

a) ¿Cuál es el índice crítico para este problema?
b) Dibuje un perfil de recursos para el programa de inicio cercano.
c) Proporcione un programa factible en recursos y su perfil, dado que se tienen seis unidades de recurso disponibles en cualquier momento.
d) Utilice el heurístico de despacho para generar un buen programa factible en recursos. Ilustre su perfil de recursos.

9.43. Considere el problema 9.25. El número de mecánicos necesarios para cada actividad está dado en la siguiente tabla.

Actividad	Mecánicos
A	5
B	5
C	4
D	6
E	2
F	3
G	1
H	4
I	7
J	4

a) ¿Cuál es el índice crítico para este problema?
b) Dibuje un perfil de recursos para el programa de inicio cercano.
c) Si se cuenta con 10 mecánicos, proporcione un programa factible en recursos para este perfí 1.
d) Utilice el heurístico de despacho para generar un buen programa factible en recursos. Ilustre su perfil de recursos.
e) Analice las ventajas y deventajas de usar 8, 10 o 12 mecánicos. Sea tan específico como sea posible.

7 TRUEQUES TIEMPO/COSTO

En secciones anteriores, se supuso que el tiempo para hacer una actividad no era controlable. No obstante, puede ser posible reducir este tiempo aumentando el esfuerzo que se le dedica. Por ejemplo, al diseñar una nueva impresora, se puede estimar que el diseño inicial toma 12 días. Este tiempo puede estar basado en un ingeniero que hace todo el trabajo de diseño preliminar. Si se asigna a la tarea a dos ingenieros de diseño en lugar de uno, podría terminarse en 8 días. Por supuesto, agregar otro ingeniero podría aumentar el costo de manera sustancial. La idea general que apoya los trueques tiempo/costo es reducir el tiempo para realizar una actividad (y, se espera, el del proyecto), aumentando el esfuerzo dedicado a ella, lo que da como resultado un aumento en los costos.

7.1 Tiempo normal y reducido

Se define el **tiempo normal** como el tiempo para realizar una actividad en condiciones normales y el **costo normal** como su costo asociado. El **tiempo reducido y** el **costo reducido** son el tiempo y el costo para completar la actividad tan rápido como sea posible. Denote los tiempos normal y reducido para la actividad *i-j* por d^H_N, d^c_H y c^n_H, c^c_H, respectivamente. Se supone que la actividad se puede terminar en cualquier tiempo entre el normal y el reducido, con un costo proporcional asociado. La figura 9-33 describe la relación entre el tiempo y el costo para una

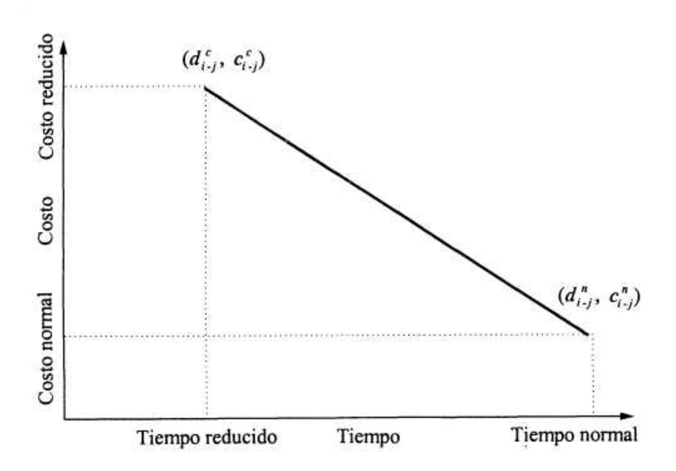


FIGURA 9-33
Relación típica tiempo/costo para una actividad

actividad típica. Aunque se supone una relación lineal, el enfoque es válido aun cuando la función tiempo/costo varíe de otra manera, por ejemplo, como una función escalonada (vea Moder *et al*, 1983). Por simplicidad, sólo se trabajará con relaciones lineales.

Existen dos razones comunes para reducir el tiempo de una actividad. La primera es que el proyecto esté atrasado y deba terminarse a tiempo; en este caso se quiere hacerlo con el menor costo posible. La segunda razón es que puede ahorrarse dinero al terminar el proyecto adelantado. Algunos costos son costos directos atribuibles a cada actividad, incluyendo el costo de acortar su duración. Otros costos son indirectos y se relacionan con el proyecto completo en lugar de con una tarea específica. Los costos indirectos incluyen costos administrativos y generales, como salario del administrador del proyecto, costo de oportunidad y costo de penalización o sanciones. Un ejemplo de costo de oportunidad sería la ganancia perdida que experimenta una compañía como resultado del retraso al colocar un nuevo producto en el mercado. Los costos de penalización, usualmente contractuales, son pagos hechos por terminar tarde; los proyectos de construcción con frecuencia especifican una sanción por cada día que el proyecto se atrasa. Por sencillez, se supone que estos costos son constantes, digamos K, por periodo. Entonces si el proyecto toma T semanas, los costos indirectos totales son $T \times K$. Si se incrementa el costo directo, puede ser que disminuya el costo indirecto. A continuación se estudia un procedimiento heurístico para hacer un trueque entre los costos directos y los indirectos.

7.2 Procedimiento heurístico para reducir

Es sencillo calcular el costo total cuando todas las actividades se realizan en su tiempo normal. Se puede encontrar la ruta crítica y T^n, la longitud normal del proyecto. El costo directo total es la suma de los costos normales para todas las actividades, y el costo indirecto total es $T^n \times K$. Denote el costo total normal por C''.

De manera similar, sustituyendo los tiempos y los costos reducidos en lugar de los normales y haciendo de nuevo los cálculos anteriores se puede obtener el tiempo reducido T^c *y* el costo C^c para el proyecto. Esto es cierto para el tiempo, pero si se redujo una actividad no crítica, se podría aumentar su tiempo reduciendo con esto el costo, sin afectar T^c. Así, el solo hecho de reducir todo puede no dar como resultado una solución mejor.

Un enfoque para el problema de trueque tiempo/costo es comenzar con la solución normal y reducir la longitud del proyecto, un periodo a la vez de la manera menos costosa. Dada la solución normal, reducir el tiempo de una actividad no crítica no disminuye la longitud del proyecto y, por ende, es un costo desperdiciado. Entonces, se quiere comenzar por acortar el tiempo de alguna actividad no crítica; pero ¿cuál debe reducirse? Parece razonable elegir la actividad con el menor costo por unidad de tiempo. Sea

$$k_{i\text{-}j} = \frac{(c^c_{i\text{-}j} - c^n_{i\text{-}j})}{(d^n_{i\text{-}j} - d^c_{i\text{-}j})}$$

el costo por unidad al acortar la duración de la actividad *i-j*. Esto se llama **costo reducido** de la actividad *i-j y* es la pendiente de la curva de costo en la figura 9-33. La duración de la actividad en la ruta crítica con el menor costo reducido, *k^*, debe disminuirse en una unidad. Esto incrementa el costo directo total en *k^ y* baja el costo indirecto total en *K*, al mismo tiempo que se reduce la terminación de proyecto en una unidad de tiempo. Después se repite el proceso.

Es fácil llevar a la práctica esta sencilla idea, siempre y cuando exista una sola ruta critica. En algún punto, es probable que más de una ruta se convierta en crítica, y al disminuir la duración de una sola actividad en una de las rutas críticas no reduce la longitud del proyecto. Suponga que existen dos trayectorias críticas; si una actividad es común a ambas, disminuir su duración decrece la longitud del proyecto. Si no hay una actividad común, se reducen dos actividades al mismo tiempo, una de cada ruta. Elegir la actividad en cada ruta con el menor costo reducido y disminuir cada una en una unidad da como resultado una disminución de una unidad en la duración del proyecto, lo que baja el costo indirecto en K y aumenta el costo directo en la suma de los dos costos reducidos para las actividades elegidas. Aun cuando exista una actividad en común a ambas trayectorias, es menos costoso reducir dos actividades si la suma de sus costos reducidos es menor que el costo reducido de la actividad común.

Ejemplo 9-12. Heurístico para el trueque tiempo/costo. La tabla 9-13 contiene los datos de la LJ9000 con los tiempos normales dados antes y los tiempos y los costos reducidos. Los tiempos están en semanas y los costos en miles de dólares. El costo reducido k_H para cada actividad y el máximo que se puede disminuir la duración de un evento, se incluyen en la tabla. Recuerde que la ruta crítica para los tiempos normales es 1-2, 2-4,4-6 y 6-8 con una duración de 20 semanas. Se utiliza el heurístico para elegir la *k¿_j* más pequeña sobre la ruta crítica, se disminuye la duración de la actividad 1-2 en una unidad de tiempo, lo que disminuye la terminación del proyecto a 19 semanas, mientras que los costos directos se incrementan en $7000. Para bajar más el tiempo de terminación, debe reducirse una actividad diferente, ya que 1-2 sólo se puede reducir una semana. El siguiente *k^* más pequeño en la ruta crítica es 8.33 para la actividad 4-6, de manera que se reduce una semana.

TABLA 9-13
Tiempo/costo normal e intensivo para el proyecto LJ9000

i-j	d^n_{i-j}	d^e_{i-j}	c^n_{i-j}	c^e_{i-j}	k_{i-j}	$d^n_{i-j} - d^e_{i-j}$
1-2	2	1	5	12	7.00	1
2-3	3	1	3	11	4.00	2
2-4	5	2	10	45	11.67	3
3-5	4	2	1	5	2.00	2
3-6	1	1	1	1	ninguna	0
4-6	6	3	17	42	8.33	3
4-7	2	1	10	25	15.00	1
5-8	8	3	0	8	1.60	5
6-8	7	3	15	72	14.25	4
7-8	4	2	10	32	11.00	2

Como puede observarse, cuando hay más de dos rutas críticas, la situación se complica. Las combinaciones de actividades comunes contra las independientes hacen que sea difícil elegir qué actividades reducir. Además, al acortar una actividad, se puede acortar otra trayectoria que era crítica, de manera que ahora se puede alargar otra actividad en la ruta crítica anterior sin aumentar la duración del proyecto. Este enfoque es un procedimiento heurístico. Por fortuna, bajos suposiciones razonables, un enfoque de programación lineal garantiza una solución óptima.

7.3 Enfoque de programación lineal para el trueque tiempo/costo

Con el fin de modelar el problema del trueque tiempo/costo como un programa lineal, se supone que todos los costos por reducir son lineales, y que los costos indirectos son constantes por unidad de tiempo. El objetivo es minimizar el costo total, es decir, la suma de los costos por reducir y los costos indirectos. El costo normal de completar el proyecto no se puede controlar, de manera que la única preocupación es sobre los costos por reducir. Sea

$y_{i\text{-}j}$ = número de unidades de tiempo que se reduce la actividad *i-j*
A = conjunto de todas las actividades en la red

Recuerde que E_n es el tiempo más cercano del evento n, donde el evento *n* corresponde al final del proyecto completo. Ahora se puede definir matemáticamente la función objetivo como

$$\text{Minimizar} \sum_{i\text{-}j \in A} k_{i\text{-}j}\, y_{i\text{-}j} + KE_n$$

Para asegurar que se respeten las precedencias, se relacionan los eventos que corresponden al inicio y a la terminación de las actividades, esto es, si *i-j* está en *A*, entonces el tiempo del evento *j*, E_j, no debe ser menor que el tiempo del evento /, E_i, más la duración real de *i-j*. La duración real de *i-j* es su duración normal, d"$_y$, menos lo que se reduce, y_H. Existe una restricción de este tipo para cada actividad en la red. Matemáticamente, se tiene

$$E_j \geq E_i + (d^n_{i\text{-}j} - y_{i\text{-}j}) \qquad \forall\ i\text{-}j \in A$$

Se hace $E_x = 0$, y se elimina de la formulación.

Ahora se asegura que una actividad no "se reduzca de más". Una actividad no se puede comprimir más que la diferencia entre sus tiempos normal y reducido. Además, la cantidad reducida no puede ser negativa. Esto se puede modelar matemáticamente por

$$0 \leq y_{i\text{-}j} \leq (d^n_{i\text{-}j} - d^c_{i\text{-}j}) \qquad \forall\ i\text{-}j \in A$$

Al unir todo esto se obtiene el siguiente programa lineal,

$$\text{Minimizar} \sum_{i\text{-}j \in A} k_{i\text{-}j}\, y_{i\text{-}j} + KE_n$$

sujeta a

$$E_j - E_i + y_{i\text{-}j} \geq d^n_{i\text{-}j} \qquad \forall\ i\text{-}j \in A$$
$$0 \leq y_{i\text{-}j} \leq (d^n_{i\text{-}j} - d^c_{i\text{-}j}) \qquad \forall\ i\text{-}j \in A$$
$$E_i \geq 0, \qquad i = 1, 2, \ldots, n$$

El enfoque de programación lineal se ilustra con la continuación del ejemplo 9-12 como sigue.

Ejemplo 9-13. PL para el trueque tiempo/costo. Con los datos de la tabla 9-13 se construye un modelo de programación lineal para determinar la logitud del proyecto óptima, dado un costo indirecto de $10 000 por semana. Este costo es el resultado del costo administrativo, el costo de capital y la pérdida de oportunidad por no tener la impresora en el mercado. El conjunto de actividades para este proyecto es

A = {1-2,2-3,2-4,3-5,3-6,4-6,4-7,5-8,6-8,7-8} El

programa lineal es

Minimizar $7y_{U2} + 4y_{2,3} + 1167y_{2_4}$ + 2j>$_{3_5}$ + 8.33>>$_{4_6}$ + 15>>$_{4_7}$sujeta a

				0 S ^2.3 S 2
E_5-E_3	$y_{2\cdot4}$			0 < $y_{2\cdot4}$ ¿ 3
		> 4	E_5 > 0	0 < $y_{,\cdot5}$ < 2
£$_7$ - E_4 E_t				
- E_5		> 6		0 ^ y_4.6 ^ 3
				0 < $y_{4\cdot7}$ < 1
		¿. o	hjo ^ u	
				0 ^ ^.$_8$ S 4
		> 4		0 á $y_{7\cdot s}$ < 2

No existe y_{3_6} porque la actividad no se puede reducir.

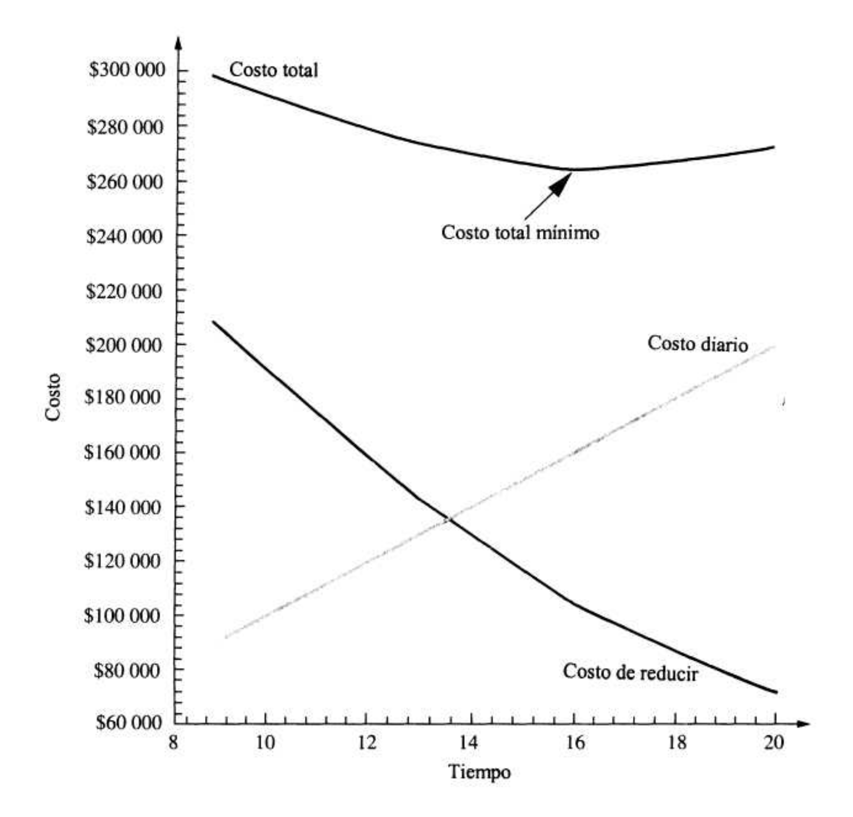


FIGURA 9-34
Costo de la LJ9000
contra el tiempo

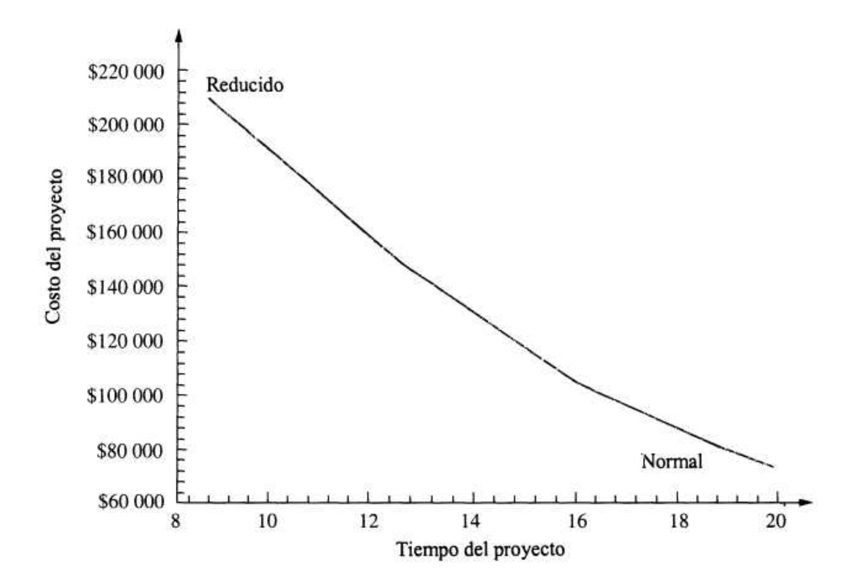


FIGURA 9-35
Gráfica del trueque tiempo/costo

Al resolver esto con un paquete adecuado de PL, se obtiene $y_{x,2} = 1$, $y_{4-6} = 3$ y £$_8$ = 16, con un costo de $191 990. Este costo considera sólo los costos indirecto y de reducir, entonces para obtener el costo total del proyecto debe sumarse $72 000 del costo normal de las actividades, lo que da un total de $263 990.

Aunque la solución óptima es importante, con frecuencia hay aspectos que no se toman en cuenta en el modelo. Entonces, en realidad se deben "estudiar" los trueques potenciales. Para esto, se puede establecer $E_n = T^n - 1$ y resolver el modelo de PL. Se repite para valores cada vez más pequeños de E_n hasta que se llegue al tiempo reducido. Después se pueden graficar los costo directos, indirectos y la suma de los dos para obtener la curva de costo total. La curva para el proyecto LJ9000 se encuentra en la figura 9-34. El punto más bajo de la curva de costo total corresponde a una longitud de proyecto de 16.

Si el costo directo por periodo se desconoce o no existe, todavía se puede usar este enfoque. Se calcula el costo directo de terminar el proyecto para cualquier unidad de tiempo entre T^c y T^n como antes, pero se hace $K = 0$. La figura 9-35 presenta una gráfica de los costos directos del proyecto LJ9000 contra el tiempo; lo mismo que la figura 9-34, pero se omitieron las curvas del costo indirecto y del costo total. Es evidente el impacto sobre el costo directo que ejerce disminuir la longitud del proyecto. La administradora del proyecto puede ahora ponderar las ventajas y desventajas de las distintas opciones y tomar su decisión final.

SECCIÓN 7 EJERCICIOS

9.44. Considere el problema 9-12 con los datos de la tabla siguiente sobre la reducción del proyecto:

á) Encuentre el tiempo normal para terminar el proyecto.
b) ¿Cuál es tiempo más cercano para la terminación del proyecto?
c) Desarrolle una curva de trueque tiempo/costo para la duración del proyecto.
d) Sin saber nada sobre el costo fijo del proyecto, dibuje una gráfica de Gantt del programa que recomienda.

Acitividad	Normal		Reducido	
	Tiempo (horas)	Costo (dólares)	Tiempo (horas)	Costo (dólares)
1-2	10	5 000	6	7 000
2-3	6	12 000	3	16 500
2-4	4	1000	2	2 600
2-5	3	500	2	600
3-4	5	2 000	3	3 200
3-6	6	1200	4	1 800
4-6	4	500	3	1500
5-6	9	3 000	7	3 600

9.45. Un contratista del departamento de carreteras del estado está construyendo un puente sobre una carretera. Trabaja con barras de concreto preconstruido. Después de hacer los cimientos, se colocan las barras sobre la carretera. Por seguridad y conveniencia, cerrarán el tramo de carretera en construcción y los vehículos se desviarán durante la colocación de las barras. Si se agrega personal y equipo se puede acelerar cada actividad durante el tiempo que se cierra el tramo de carretera. Lisa, la administradora del proyecto, ha recolectado los siguientes datos:

Descripción	Precede a	Normal		Reducido	
		Tiempo (horas)	Costo (dólares)	Tiempo (horas)	Costo (dólares)
A: bombear agua	D	9	110	6	170
B: preparar pernos	E	S	150	6	200
C: colocar barras	F	15	250	10	400
D: pruebas	F	5	80	3	100
E: anclar barras	F	10	90	6	150
F: terminados	—	2	110	1	150

a) **Encuentre el tiempo normal para colocar las barras.**
b) **¿Cuál es el tiempo más rápido para colocar las barras?**
c) **Desarrolle una curva de trueque/costo para la duración del proyecto.**
d) **Si los costos fijos son $60 por hora, ¿cuál es el costo mínimo de la duración del proyecto? Construya una gráfica de Gantt que muestre el mejor programa.**

9.46. Desarrolle un enfoque para el problema de trueque tiempo/costo, si los costos de reducir no son li neales.

9.47. ¿Cómo puede usarse la planeación, programación y control de proyectos para acelerar el tiempo de introducción de un producto? {*Sugerencia:* piense en prescindir de actividades, comprimirlas y cambiar la estructura de precedencia lo más posible.)

8 SOFTWARE

En general, se necesita una computadora para la planeación, programación y control de proyectos. Una computadora es maravillosa para los cálculos de los tiempos de inicio cercano y lejano, las holguras y las rutas críticas. Es útil para el análisis de costos, la asignación de recursos y los trueques tiempo/costo; pero aún más importante, proporciona los datos a tiempo para las actualizaciones y es muy conveniente para el análisis de "qué pasa si".

Si decide usar una computadora, existen muchos paquetes disponibles. La primera decisión es si compra software para una microcomputadora o renta software para una mini o una computadora grande. Hubo una época en que los proyectos grandes sólo se podían manejar en computadoras grandes, pero ya no es así. Los costos de los paquetes para microcomputadoras van de cero (los de dominio público) a 50 000 dólares por las versiones más elaboradas. Los paquetes para las mini y las grandes cuestan desde 5000 a varios cientos de miles de dólares. Muchos paquetes de 500 dólares tienen buen desempeño para las funciones básicas de programación. Si se agregan costos y control de recursos el precio aumenta. La capacidad para reducir actividades se encuentran en paquetes más avanzados. Unos cuantos realizan nivelación y asignación de recursos, pero tal vez sólo usen un heurístico de despacho sencillo.

Como la industria del software cambia con rapidez, no se mencionan paquetes específicos. Periódicamente, se publican listas y comparaciones del software disponible para la planeación, programación y control de proyectos. Los ejemplos incluyen: Wortman (1989), Yahdav (1992), Bloom (1993) y "Project Management Software Buyer's Guide" (1995). Un análisis detallado sobre la selección de software para la administración de proyectos se encuentra en Kezbom *et al* (1989).

Varias revistas tienen columnas que evalúan paquetes específicos de planeación, programación y control de proyectos. Éstas incluyen *Cosí Engineering, Project Management Journal, Byte, PC Magazine* y *PC World.* En la sección 11 se hace referencia a muchos ejemplos. Algunos paquetes son tan populares que se han escrito libros sobre ellos, como Day (1995).

Para proyectos sencillos puede ser suficiente el software "académico". De nuevo existe una gran variedad de paquetes, que incluye a Chang (1995) y Emmons *et al* (1989).

9 EVOLUCIÓN

Los egipcios usaron los conceptos de planeación, organización y control hace más de 6000 años; es probable que se usara alguna forma de planeación, programación y control en la construcción de las pirámides. No fue sino hasta mediados de los 50 cuando se formalizó el procedimiento. Sin embargo, existen dos precursores que deben mencionarse. La gráfica de Gantt (1911) contiene las ideas fundamentales de la planeación, programación y control de proyectos. Karol Adamiecki, un científico polaco, desarrolló la gráfica armónica en 1931, una gráfica tipo Gantt diseñada especialmente para la programación de proyectos. Se ordenaban las actividades según sus precedencias y se iniciaban lo más pronto posible, es decir, una pasada hacia adelante. Como las actividades estaban representadas por tabuladores que corrían, resultaba sencillo llevar a cabo la actualización y reprogramación. Su descubrimiento no se difundió y pronto se desvaneció.

A mediados de la década de 1950, tres grupos independientes desarrollaron la planeación, programación y control de proyectos que conocemos hoy. La sección de investigación de operaciones del British Central Electricity Generating Board quería reducir el tiempo de la reparación general de una planta generadora. Para 1957 habían desarrollado una metodología para identificar la ruta crítica. Eventualmente se redujo el tiempo para reparar una planta en más de 40% (Lockyer, 1969).

Durante el mismo periodo, un equipo compuesto por empleados de Lockheed Aircraft Corporation, de Booz, Alien y Hamilton Consultants y de U.S. Navy trabajaron para reducir los costos y el tiempo de terminación de proyectos gubernamentales. Malcolm *et al* (1959) publicaron su metodología, llamada PERT. El sistema de armamento Polaris fue planeado, pro-

gramado y controlado usando PERT y terminó antes de la fecha programada y abajo del presupuesto.

Otra colaboración, hecha por la compañía Du Pont junto con la Remington Rand Univac, produjo el CPM (Walker y Sayer, 1959). También deseaban reducir el tiempo dedicado a reparaciones generales en la planta, mantenimiento y construcción. Este grupo introdujo el modelo básico de tiempo/costo (Kelley y Walker, 1959; Kelley, 1961).

El éxito de estos métodos condujo a estándares gubernamentales para controlar los costos de los proyectos que financiaban (DOD and NASA Guide, 1962). Comenzó la investigación sobre el balanceo de recursos (Burgess y Killebrew, 1962) y los heurísticos para modelos con restricción de recursos (Weist, 1964, 1967). En 1964, Moder y Phillips publicaron la primera edición de su libro clásico, *Project Management with CPM, PERT and Precedence Diagramming* (actualizado en Moder *et al*, 1983).

A finales de los 60 y principios de los 70 se desarrollaron paquetes de software comerciales para computadoras grandes. Éstos eran muy costosos y difíciles de usar. Los datos de entrada (y algunas veces los de salida) se perforaban en tarjetas y con frecuencia llevaba de ocho a diez horas de tiempo de computadora tan sólo actualizar un proyecto grande. El gobierno impulsó el uso continuo de los sistemas (USAFSC, 1976). Se dedicaron esfuerzos a la investigación sobre estimaciones probabilísticas, algoritmos heurísticos de programación con restricción de recursos y diferentes medidas de desempeño, pero ya se habían establecido los fundamentos de planeación, programación y control. El primer libro de texto riguroso sobre el tema fue escrito por Elmaghraby en 1977.

La proliferación de las computadoras personales ha sido un factor dominante en la planeación, programación y control durante los últimos 15 años. Se han desarrollado muchos paquetes amigables y están disponibles a precios razonables. Esta tecnología ha puesto una gran herramienta sobre el escritorio de muchos administradores y analistas. La investigación en las mismas áreas continúa: recursos limitados (Olaguibel y Goerlich, 1989; Oguz y Bala, 1994); nuevas medidas de desempeño como costos de retraso (Kim, 1993), penalización por adelanto/tardanza (Padman y Smith-Daniels, 1993) y objetivos múltiples (Davis *et al*, 1992; Slowinski *et al*, 1994); aspectos probabilísticos (Gong y Hugsted, 1993; Keefer y Verdini, 1993), y nuevas técnicas de solución (Icmeli y Erenguc, 1994). Varios libros, como Slowinski y Weglarz (1989), Morton y Pentico (1993) y Sprecher (1994) profundizan en aspectos particulares de la planeación, programación y control. Otros, por ejemplo, Badiru (1994), Cleland (1994) y Kezbom *et al* (1989), proporcionan textos introductorios comprensibles.

10 RESUMEN

Este capítulo estudió los proyectos, un conjunto de actividades interrelacionadas que deben terminar para lograr una meta. Un proyecto puede desarrollar un nuevo producto o sistema, dar mantenimiento a equipo existente, instalar equipo nuevo o construir una planta. Los elementos principales son la planeación, la programación y el control.

La planeación ocurre tanto antes como durante la ejecución del proyecto. La elección de un administrador del proyecto y del equipo son parte de la planeación. La estructura organizacional puede ser por proyecto, por personal o matricial. Otra parte de la planeación es definir el proyecto. Esto incluye la definición de las actividades y la estimación de sus duraciones, costos y requerimientos de recursos. Deben determinarse las precedencias de las actividades y especificarse la red final.

La programación consiste en asignar los tiempos de inicio de cada actividad. Los cálculos requeridos se componen de una pasada hacia adelante, para obtener los tiempos de inicio más cercanos y una pasada hacia atrás para calcular los tiempos de inicio más lejanos. Las actividades críticas se identifican como actividades que merecen toda la atención. También se definen los programas de inicio cercano y de inicio lejano.

Una vez que el proyecto está en marcha, debe controlarse. Conforme las actividades avanzan, se actualizan las estimaciones de tiempo, dinero y recursos. El proyecto se programa de nuevo para tomar en cuenta los eventos reales. Para controlar los recursos, el proyecto se divide en paquetes de trabajo o en estructuras de trabajo desglosadas. Las variaciones entre el uso real de recursos y el programado señalan puntos de conflicto en el proyecto. Aunque es más común dar seguimiento al tiempo y al dinero, cualquier recurso se puede controlar de esta manera.

Para tomar en cuenta la incertidumbre en la duración de las actividades, se introdujo el PERT. Se supone que la duración de cada actividad sigue una distribución de probabilidad; se estudiaron los casos de la uniforme, la triangular y la beta. La ruta crítica, con las duraciones esperadas, se encuentra de la manera estándar. Después se puede llevar a cabo un análisis probabilístico del tiempo de terminación del proyecto usando el teorema del límite central. Es posible que las suposiciones requeridas para este enfoque no siempre sean válidas; esto lleva a determinar las limitaciones del PERT.

Otra extensión de los cálculos básicos del proyecto es incluir recursos limitados, que pueden causar retrasos en el desarrollo del proyecto. Puede resultar muy complejo encontrar soluciones factibles en recursos a estos problemas. Hacer gráficas que muestren los perfiles de recursos puede ayudar para la programación de proyectos. El índice crítico indica la importancia del uso efectivo de un recurso específico. Se presenta un heurístico de despacho sencillo para recursos fijos. Se mencionan en forma breve otras variaciones, como nivelación o balanceo de recursos, recursos múltiples y proyectos múltiples.

Si aumentar los recursos puede disminuir el tiempo para realizar una actividad, se tiene un trueque tiempo/costo. Puede quererse pagar más para reducir la duración de una actividad si esto reduce el costo indirecto del proyecto o si hace que el proyecto termine antes. Se definen el tiempo y el costo normales y reducidos y se supone que la relación entre el tiempo y el costo es lineal. Se presenta un heurístico sencillo de costo/unidad de tiempo. Para problemas más grandes, el número y las combinaciones de actividades críticas y casi críticas hace que el heurístico no sea práctico. Se expone un modelo de programación lineal que optimiza el costo total para un costo indirecto dado. Su solución proporciona una gráfica de trueque tiempo/costo.

Por último, se hizo un análisis breve del software y de la evolución de la planeación de proyectos.

MINICASO: FABRICANTES DE LLANTAS FASTRAK

La reciente popularidad de las llantas FasTrak ha dado como resultado un incremento en las ventas al punto de que FasTrak no puede producir lo suficiente. Carmen, una ingeniera de manufactura, propone agregar una estación de enfriamiento después del curado, lo cual debe reducir el tiempo un 15%, y, por ende, agregar capacidad. José, el gerente de la planta, está de acuerdo con su idea. Ahora ella debe planear el proyecto del enfriador de la cara de la llanta. El proyecto comienza con un diseño y una distribución preliminares, que toman 20 días. Después de este tiempo, se pueden diseñar los tres subsistemas —estructural, térmico y de

mando—. Una vez terminado el diseño estructural, el tanque de enfriamiento se puede diseñar en 20 días y ordenarse el material de la estructura, lo que llevará 30 días. El tanque de enfriamiento se compra y requiere 50 días para su entrega. Cuando los materiales estructurales lleguen, se requieren 15 días para construir la estructura; después se pinta en 5 días. La instalación del tanque en la estructura pintada requiere 10 días. El sistema térmico completo se compra y tiene un tiempo de entrega de 40 días a partir de que se coloca la orden. Serán necesarios 20 días para instalar el sistema térmico, y esto se hace antes de pintar la estructura. El diseño del sistema de mando requiere un conjunto completo de planos eléctricos, que toman 5 días. Esto especificará las partes eléctricas que deben ordenarse y que se recibirán 40 días después. Se ordenan las componentes de mando (tiempo de entrega de 20 días) y la instalación de la unidad de mando toma 3 días y sólo se puede hacer después de montar el tanque en la estructura. El sistema eléctrico debe instalarse (7 días) después del tanque, pero antes del sistema de mando. Debe agregarse una tubería de recirculación después de instalar el tanque; esto requiere 5 días. Por último, se conecta el sistema eléctrico (1 día) y el sistema se prueba durante dos días. Después se libera para incluirse en la producción.

Todas las actividades que se realizan en la planta usan una combinación de ingenieros (I) mecánicos (M) y trabajadores (T). El diseño estructural, el diseño del sistema de mando, el diseño térmico, el diseño del tanque, los planos eléctricos, la construcción de la estructura, la instalación del sistema térmico, la instalación del sistema de mando, la del sistema eléctrico, las conexiones eléctricas y todas las pruebas requieren un ingeniero. La instalación del sistema térmico, de mando, eléctrico, la del tanque, la conexión y las pruebas requieren mecánicos. La construcción de la estructura, la pintura de la misma, la instalación de los sistemas térmico, de mando y eléctrico, la instalación del tanque y de la tubería de circulación, la conexión y las pruebas requieren trabajadores. Todos los tiempos dados suponen un equipo de un ingeniero, dos mecánicos y un trabajador. El proyecto dispone de dos ingenieros, seis mecánicos y cuatro trabajadores.

Los tiempos se estimaron con la exactitud que fue posible, pero Carmen piensa que pueden estar en un intervalo de 5% más cortos y 10% más largos. El tiempo de entrega de las partes y subsistemas se preguntó a los proveedores. El tiempo de entrega de cualquier orden se puede reducir 25% mediante un pago adicional de $10 000. Dos ingenieros, dos mecánicos y tres trabajadores se pueden reasignar de otras labores para disminuir el tiempo para realizar la tarea. Duplicar la fuerza de trabajo disminuye a la mitad la duración de una actividad. Sin embargo, la asignación de más del doble de la fuerza de trabajo no la hace significativamente más corta. Un ingeniero reasignado le cuesta a la compañía $500 por día por la pérdida de oportunidad en otras tareas. Un mecánico cuesta $200 por día y un trabajador $400 diarios. Si una tarea requiere más de una habilidad, todas deben incrementarse para reducir el tiempo. Cada día que el enfriador no está en operación cuesta $ 10 000 en ventas perdidas. Ayude a Carmen a planear este proyecto.

11 REFERENCIAS

Badiru, A. B., *Comprehensive Project Management: Integrating Optimization Models, Management Practices, and Computers*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1994.

Bloom, R., "Software for Project Management", *Transportation & Distribution*, 34, 33-34, 1993.

Burgess, A. R. y Killebrew, J. B., "Variation in Activity Level on a Cyclic Arrow Diagram", *Journal of Industrial Engineering*, 13,76-83, 1962.

Chang, Y. L., *QS: Quantitaíive Systems Versión 3.0*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995.

Cleland, D. L, *Project Management: Strategic Design and Implementation*, The McGraw-Hill Companies, Inc., Nueva York, 1994.

Davis, K. R., Stam, A. y Grzybowski, R. A., "Resource Constrained Project Scheduling with Múltiple Objectives: A Decisión Support Approach", *Computers & Operations Research*, 19,657-669,1992.

Day, P. J., *Microsoft Project 4.0 for Windows and the Macintosh: Setting Project Management Standards*, Van Nostrand Reinhold, Nueva York, 1995.

DODandNASA Guide, PERTCosí Systems Design, CatalogD 1-6/2: P94, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 1962.

Elmaghraby, S. E., *Activity Networks*, John Wiley & Sons, Nueva York, 1977.

Emmons, H., Flowers, A. D., Khot, C. M. y Mathur, K., *STORM: Quantitative Modelingfor Decisión Support*, Holden-Day, Oakland, CA, 1989.

Gantt, H. L., ed, *How Scientific Management Is Applied*, Hive Publishing Company, Easton, PA, 1911.

Gong, D. y Hugsted, R., "Time-Uncertainty Analysis in Project Networks with a New Merge-Event Time-Estimation Technique", *International Journal of Project Management*, 11, 165-174, 1993.

Hiñes, W. W. y Montgomery, D. C, *Prohability and Statistics in Engineering and Management Science*, John Wiley & Sons, Nueva York, 1990.

Icmeli, O. y Erenguc, S. S., "A Tabú Search Procedure for the Resource Constrained Project Scheduling Problem with Discounted Cash Flows", *Computers & Operations Research*, 21, 841-853, 1994.

Keefer, D. L. y Verdini, W. A., "Better Estimation of PERT Activity Time Parameters", *Management Science*, 39, 1086-1091,1993.

Kelley, J. E., "Critical Path Planning and Scheduling: Mathematical Basis", *Operations Research*, 9, 296-320,1961.

Kelley, J. E. y M. R. Walker, "Critical Path Planning and Scheduling", *Proceedings, Eastern Joint Computer Conference*, 160-173, 1959.

Kezsbom, D. S., Schilling, D. L. y Edward, K. A., *Dynamic Project Management: A Practical Guide for Managers and Engineers*, John Wiley & Sons, Nueva York, 1989.

Kim, S.-Y. y Leachman, R. C, "Multi-Project Scheduling with Explicit Lateness Costs", *HE Transactions*, 25, 34-44, 1993.

Lockyer, K. G., *Introduction to Critical Path Analysis*, Pitman Publishing Company, London, UK, 1969.

Malcolm, D. G., Roseboom, J. H., Clark, C. E. y Fazar, W., "Applications of a Technique for R & D Program Evaluation (PERT)", *Operations Research*, 7, 646-669,1959.

Moder, J. J., Phillips, C. R. y Davis, E. W., *Project Management with CPM, PERT and Precédeme Diagramming*, Van Nostrand Reinhold Company, Nueva York, 1983.

Morton, T. E. y Pentico, D. W., *Heuristic Scheduling Systems*, John Wiley & Sons, Nueva York, 1993.

Oguz, O. y Bala, H., "A Comparative Study of Computational Procedures for the Resource Constrained Project Scheduling Problem", *European Journal of Operational Research*, 72, 406-416, 1994.

Olaguibel, R. A.- V. y Goerlich, J. M. T., "Heuristic Algorithms for Resource-Constrained Project Scheduling: A Review and an Empirical Analysis", en *Advances in Project Scheduling*, Slowinski, R. y Weglarz, J., eds., Elsevier, Amsterdam, 1989.

Padman, R. y Smith-Daniels, D. E., "Early-Tardy Cost Trade-Offs in Resource Constrained Projects with Cash Flows: An Optimization-Guided Heuristic Approach", *European Journal of Operational Research*, 64, 295-311, 1993.

"Project Management Software Buyer's Guide", *Industrial Engineering*, marzo 1995, pp. 36-37.

Slowinski, R., Soniewicki, B. y Weglarz, J., "DSS for Multiobjective Project Scheduling", *European Journal of Operational Research*, 79, 220-229, 1994.

Slowinski, R. y Weglarz, J. eds., *Advances in Project Scheduling*, Elsevier, Amsterdam, 1989.

Sprecher, A., *Resource-Constrained Project Scheduling: Exact Methods for the Multi-Mode Case*, Springer-Verlag, Nueva York, 1994.

U.S. Air Forcé Systems Command, *Cost/Schedule Control Systems Criteria, Joint Implementation* *Guide*, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 1976.

Ulrich, K. T. y Eppinger, S. D., *Product Design and Development*, The McGraw-Hill Companies, Inc., Nueva York, 1995.

Walker, M. R. y Sayer, J. S., "Project Planning and Scheduling", Report 6959, E. I. Du Pont de Nemours and Co., Wilmington, DE, 1959.

Weist, J.D., "Some Properties of Schedules for Large Projects with Limited Resources", *Operations Research*, 12, 395-418, 1964.

Weist, J. D., "Heuristic Model for Scheduling Large Projects with Limited Resources", *Management Science*, 13, B359-B377, 1967.

Wortman, L. A., "Marketing Software Review: Project Management Made Easy", *Business Marketing*, 74, 20-24, 1989.

Yahdav, D., "Tracking the Elusive Project", *Byte*, 17, 119-122, 1992.

CAPÍTULO 10

Planeación y control de la producción integrados

1 INTRODUCCIÓN

Louisa es gerente de producción de una pequeña compañía de productos farmacéuticos que tiene alrededor de 300 empleados y ventas anuales de cerca de $45 millones; fabrica pildoras, tabletas y pastillas sólidas genéricas y otros medicamentos. Se trata de una empresa familiar que tiene más de 50 años en el negocio.

A través de los años, la empresa ha computarizado su producción y ha adquirido varias herramientas de ayuda en la planeación y el control. La compañía compró un paquete de planeación de requerimientos de materiales para generar los programas maestros de producción y las órdenes de compra, y para el seguimiento del inventario. Como la explosión de materiales es elemental, pensaron que un paquete relativamente sencillo sería suficiente. Más tarde introdujeron también un sistema de pronósticos para ayudar el departamento de mercadotecnia y un paquete de costeo. La calidad del producto se supervisa mediante un sistema computarizado de control de calidad.

Inicialmente, Louisa sintió que estos sistemas le proporcionaban un buen desahogo para administrar la producción en forma adecuada. Sin embargo, las cosas han cambiado en los últimos años. El mercado del medicamento genérico ha sufrido cambios y la competencia es feroz; esto ha generado presiones para que Louisa disminuya, de manera drástica, el tiempo de entrega y el costo de producción. Descubrió que los sistemas de la compañía no respondían bien al nuevo entorno. Pensó que su problema más importante era la falta de coordinación entre los distintos sistemas, los cuales usaban cada uno su base de datos. Más aún, su tiempo de respuesta era demasiado lento y, como los lotes de producción debían moverse más rápido en la planta, el control se complicaba. También se preguntó si el nuevo entorno requería cambios en la forma de interacción de la producción con el resto de las funciones de la organización.

Los problemas de Louisa son comunes en muchas organizaciones industriales. La respuesta a ellos, en general, es la integración y, en particular, la planeación y control de la producción integrados.

La parte medular de este capítulo es la planeación y control de la producción integrados. Sin embargo, primero se estudiarán tres aspectos relacionados: la interacción de la producción con el resto de la organización, el control y la integración entre plantas.

2 ASPECTOS RELACIONADOS CON LA INTEGRACIÓN

2.1 La producción y la organización

La producción es una componente de la organización de manufactura. Como tal, interactúa con el resto de la organización, es decir, las decisiones tomadas en ella afectan la producción y viceversa. No hay nada nuevo en esta afirmación -también fue válida en la era de los sistemas controlados por la producción. Lo que es distinto es la forma en que se lleva a cabo esta interacción en la era de los sistemas controlados por el mercado, en los que la integración es el móvil primordial. En el capítulo 2 se analizaron dos características importantes de la integración, quitar barreras dentro de la organización y la integración de la información. Se profundizará en estos dos conceptos.

La organización funcional tiende a crear barreras; la suposición esencial es que la diferenciación es la clave para la eficiencia y el control. Un enfoque organizacional distinto surge como parte de la era controlada por el mercado -la organización basada en el proceso.

La suposición primordial de la organización basada en el proceso es que la integración optimiza la operación de toda la empresa. Un antecedente de la organización por procesos es el enfoque del equipo multifuncional (capítulo 2).

Entonces, ¿qué es una organización por proceso y cómo se integra la producción? Los procesos ocurren anidados en una jerarquía de tres niveles.[1]

Nivel 1 "Los procesos operacionales... Crean directamente valor para el cliente... Y otras áreas de la organización." La manufactura pertenece a este nivel, junto con el desarrollo del producto, el servicio al cliente y otros procesos que agregan valor.

Nivel 2 "La planeación estratégica y el control de procesos ... Proporcionan recursos o un efecto de mejora en los procesos operacionales." Esto incluye todas las decisiones a corto y mediano plazos necesarios para activar los procesos de nivel 1. Algunos ejemplos son la asignación de recursos a los procesos, el desarrollo de medidas, la inversión de capital y la expansión de la capacidad.

Nivel 3 "Guiar y activar procesos crea el objetivo, la visión y el carácter de la organización." Éstos incluyen establecer los objetivos y administrar el cambio organizacional.

La producción, que es parte del nivel 1, necesita integración tanto lateral como vertical -la integración lateral dentro del nivel con funciones como desarrollo de productos y mercadotecnia e integración vertical con los procesos de nivel superior como asignación de recursos y cambio.

Una organización basada en los procesos, por implicación, adopta el *síndrome de barreras caídas.* Esto significa un cambio importante en la cultura (nivel 3) y en los procesos organizacionales. Se mencionó el trabajo en equipo, y ahora se profundizará en la integración de la información.

[1]De Jean-Phillippe Deschamps y R. Ranganath Nayak, *ProductJuggernauts: How Companies Mobilize to Genérate a Stream of Market Winners,* Boston: Harvard Business School Press, 1995, 384-385.

Se usa un ejemplo para analizar el tema (Erens y Hegge, 1994). Para centrar este análisis, se muestra la integración de la información en el nivel 1, entre producción y ventas. Esta integración se logra a través de una base de datos común y el flujo de información.

Medicom es uno de los más grandes fabricantes de equipo de rayos X para doctores y hospitales. La mayor parte de los sistemas médicos se ofrecen al mercado con miles de variantes. Como el tiempo de entrega varía de uno a seis meses, permite a Medicom ensamblar las variantes del producto con tres modalidades: producción para inventario (producto final), producción para componentes (subensambles) o producción por pedido. Esto es posible porque la variedad de productos de Medicom tiene forma de reloj de arena (vea el capítulo 7).

En la figura 10-1 se muestra la manera en que la información integra las ventas a clientes y la manufactura. La información se intercambia entre distintos niveles, esto es, diseño, planeación de la producción, comunicación de mercadotecnia, información de órdenes y operaciones. El proceso principal muestra el flujo de materiales de manufactura a ensamble, empaque, distribución e instalación, que se realizan en diferentes localizaciones geográficas. Un sistema MRP controla toda esta actividad (lado derecho de la figura 10-1). También integra el flujo de las órdenes y la planeación de la producción; parte de la base de datos, la explosión de materiales, da servicio a la comunicación de mercadotecnia. Éste es un ejemplo de integración de información entre los niveles 1 y 2.

La situación de control de la producción se determina por el grado de penetración de una orden de un cliente (y su identificación) en la organización de manufactura (nivel 1). En el caso en que los productos terminados se fabrican para inventario o se ensamblan por pedido donde se encuentra el cliente, sólo la parte de ventas (en contacto directo con el cliente) conoce la identificación de la orden. Si los productos se ensamblan por pedido, la identificación de la orden se conoce en el ensamble final. Así, el sistema de control de la producción debe poder manejar tres modos de control distintos: sistemas de producción para inventario, componentes producidas para inventario y ensamble por pedido. Éste es un ejemplo de integración lateral. Se estudiará ahora el aspecto de control.

2.2 Arquitectura del control

La integración de una compañía es una estrategia y una tecnología. La estrategia es integrar las decisiones estratégicas, tácticas y de cada día. El apoyo para esta integración es una tecnología que permite la implantación de un flujo de información eficiente y oportuno. La parte medular de esta tecnología es la arquitectura del control. Existen varias alternativas para la arquitectura del control y se analizarán en esta sección.

La arquitectura, en general, se define como la estructura que hace sistemas a partir de componentes. En consecuencia, la arquitectura del control construye un sistema de control a partir de componentes. Entonces, por ejemplo, la arquitectura del control de un sistema de producción avanzado dirige las actividades de procesado y manejo que transforman la materia prima en productos terminados. Por lo tanto, se requiere que la arquitectura del control incluya muchos aspectos para la *toma de decisiones*, como la asignación de recursos, la programación de partes y las rutas.

La arquitectura del control asigna estas responsabilidades de toma de decisiones. Además, define la interrelación entre las componentes de control, estableciendo los mecanismos para coordinar la ejecución de las decisiones.

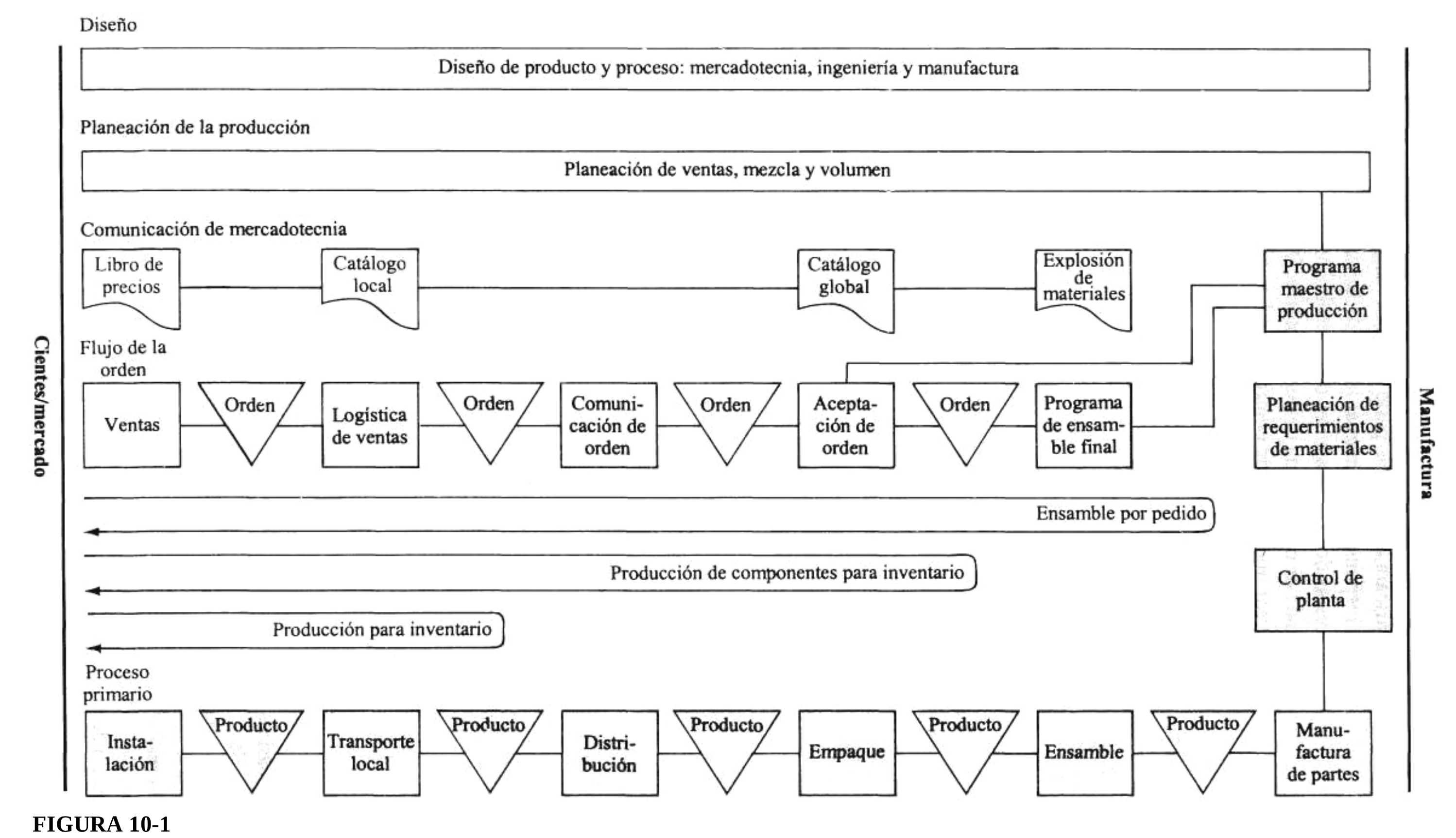


FIGURA 10-1
Integración de clientes y manufactura [reimpreso de Erens y Hegge (1994) con el amable permiso de Elsevier Science-NL, Sara Burgerhartstraat 25, 1055 KV, Amsterdam, Holanda]

Se considera, por ejemplo, un sistema de manufactura flexible. La arquitectura del control especificará la siguiente parte que debe cargarse al sistema. Otra componente de control puede ser la responsable de marcar la ruta de la parte. La arquitectura también definirá la interacción entre estas dos componentes de control. Como una consecuencia, se obtiene una actividad coordinada de carga y ruta de nuevas partes. Otras extensiones a esta arquitectura de control pueden crear un sistema de control completo para manufactura flexible (Dilts *et al*, 1991).

La asignación anterior de la toma de decisiones no es la única posible. Otro tipo de asignación puede ser más o menos efectiva. Deben hacerse dos observaciones: la arquitectura de control determina la efectividad del sistema de control, y puede haber más de un diseño de una arquitectura de control.

Es común identificar cuatro diseños básicos de la arquitectura del control (Dilts *et al*, 1991), a saber, centralizado, jerárquico apropiado, jerárquico modificado y jerárquico (figura 10-2). Estos diseños muestran una tendencia hacia un control cada vez más repartido. Sin embargo, cada diseño contiene todas las responsabilidades de control que deben ejecutarse. Por costumbre, están divididos en tres niveles jerárquicos: planta, célula y máquina (figura 10-3). El nivel de la planta maneja el programa maestro de producción: rutas entre células y asignación global de recursos para cumplir con los requerimientos de producción, administración del inventario total, etcétera. El nivel de la célula está enfocado a la planeación del proceso, la programación y los trabajos en proceso dentro de la célula. El nivel de la máquina se concentra en la ejecución de operaciones de partes en tiempo real de dos tipos: cambios en la parte y manejo de materiales. En general, al bajar en los niveles de control, el nivel de detalle aumenta y el periodo considerado disminuye.

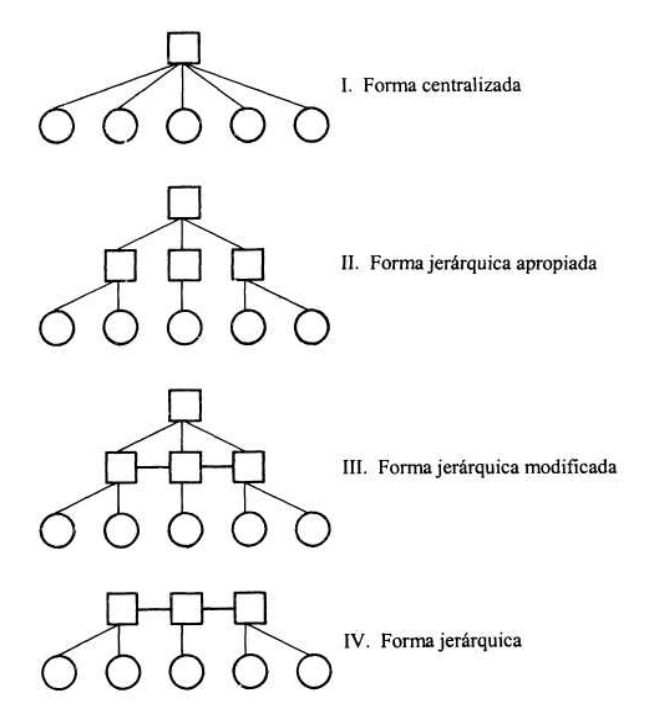


FIGURA 10-2
Cuatro formas básicas de arquitecturas de control [de Dilts, Boyd y Whorms(1991), reimpreso de *Journal of Manufacturing Systems*, con permiso de la Society of Manufacturing Engineers.]

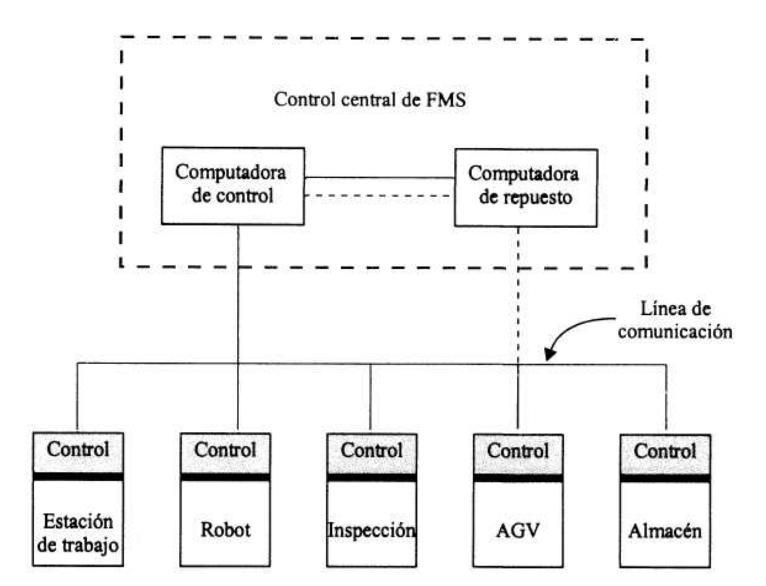


FIGURA 10-4
Arquitectura de control de un FMS

En la figura 10-4 se muestra una implantación posible de esta arquitectura de control, como parte de un sistema de manufactura flexible (FMS). General Motors usó una arquitectura similar en su planta de ensamble en Oshawa, Ontario, Canadá (Bookbinder y Kotwa, 1987) en el subsistema de marcos de carrocería. Tenían una flota de alrededor de 60 transportadores AGV (un transportador AGV—guía de vehículos automatizada— es un vehículo con movimiento propio que es guiado por una trayectoria dentro de la planta, opera de manera independiente y lo controla una computadora), cerca de 90 robots y 10 células de trabajo. El flujo de las operaciones en los AGV y con los robots estaba controlado por siete controladores lógicos programables. La computadora grande de la planta se encargaba del programa de producción y de aspectos como instrucciones de operación a corto plazo para las microcomputadoras.

Entre las ventajas de este diseño está una respuesta rápida de la computadora que supervisa y la habilidad para manejar situaciones urgentes. Las desventajas incluyen complicaciones en el diseño del sistema de control y problemas de conexiones para las comunicaciones con homólogos.

El **diseño jerárquico** tiene componentes de control autónomas distribuidas localmente que se comunican con otras componentes *sin* la relación amo-esclavo. Estas componentes de control reciben información encapsulada, y es importante que funcionen como módulos. Estos sistemas de control trabajan como procesos de cooperación independientes sin un control directo centralizado o explícito. Las decisiones de control se toman a través de "acuerdos mutuos" y la información se intercambia libremente. La ventaja es que se puede lograr una respuesta rápida, flexibilidad y soluciones robustas. No obstante, el flujo masivo de información y las decisiones miopes pueden entorpecer al sistema. Este tipo de arquitectura de control es todavía un tema de investigación, y sólo existe un número limitado de aplicaciones. En la tabla 10-1 se resumen las características de las cuatro arquitecturas de control.

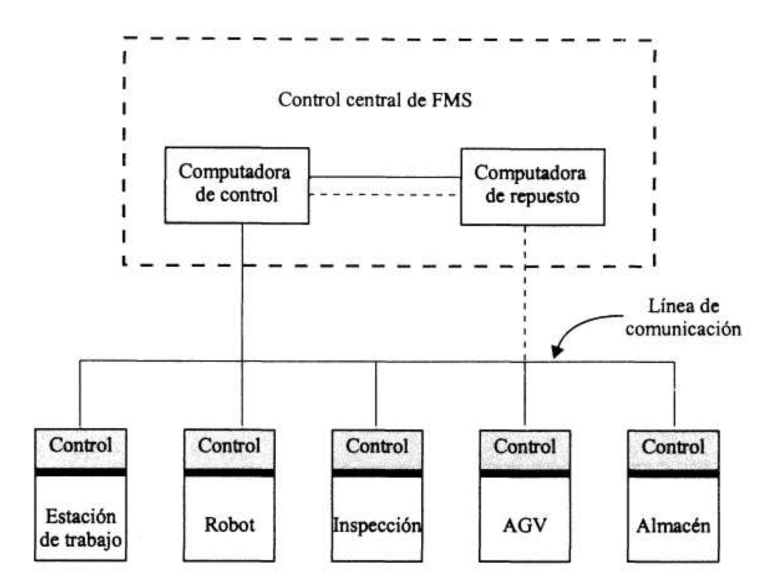


FIGURA 10-4
Arquitectura de control de un FMS

En la figura 10-4 se muestra una implantación posible de esta arquitectura de control, como parte de un sistema de manufactura flexible (FMS). General Motors usó una arquitectura similar en su planta de ensamble en Oshawa, Ontario, Canadá (Bookbinder y Kotwa, 1987) en el subsistema de marcos de carrocería. Tenían una flota de alrededor de 60 transportadores AGV (un transportador AGV—guía de vehículos automatizada— es un vehículo con movimiento propio que es guiado por una trayectoria dentro de la planta, opera de manera independiente y lo controla una computadora), cerca de 90 robots y 10 células de trabajo. El flujo de las operaciones en los AGV y con los robots estaba controlado por siete controladores lógicos programables. La computadora grande de la planta se encargaba del programa de producción y de aspectos como instrucciones de operación a corto plazo para las microcomputadoras.

Entre las ventajas de este diseño está una respuesta rápida de la computadora que supervisa y la habilidad para manejar situaciones urgentes. Las desventajas incluyen complicaciones en el diseño del sistema de control y problemas de conexiones para las comunicaciones con homólogos.

El **diseño jerárquico** tiene componentes de control autónomas distribuidas localmente que se comunican con otras componentes *sin* la relación amo-esclavo. Estas componentes de control reciben información encapsulada, y es importante que funcionen como módulos. Estos sistemas de control trabajan como procesos de cooperación independientes sin un control directo centralizado o explícito. Las decisiones de control se toman a través de "acuerdos mutuos" y la información se intercambia libremente. La ventaja es que se puede lograr una respuesta rápida, flexibilidad y soluciones robustas. No obstante, el flujo masivo de información y las decisiones miopes pueden entorpecer al sistema. Este tipo de arquitectura de control es todavía un tema de investigación, y sólo existe un número limitado de aplicaciones. En la tabla 10-1 se resumen las características de las cuatro arquitecturas de control.

TABLA 10-1

Resumen de características de arquitecturas de control, ventajas y desventajas

Centralizada

Características	Ventajas	Desventajas
Una sola computadora grande Todas las decisiones de control se toman en un solo sitio Una base global de datos registra todas las actividades del sistema	[1] Acceso a la información global [1] Es posible la optimización global [1] Una sola fuente para la información del estado del sistema	Velocidad de respuesta lenta e inconsistente [1] Se depende de una sola unidad de control Es difícil modificar el software de control

Jerárquica apropiada

Características	Ventajas	Desventajas
Varias computadoras de distintos tipos Relaciones rígidas amo-esclavo entre los niveles de toma de decisiones El supervisor coordina todas las actividades de los subordinados En cada nivel hay una base de datos agregada	• Implantación gradual, redundancia y reducción de problemas en el desarrollo del software • Adición incremental del control posible [1] Posibilidad de un comportamiento de adaptación • Permite diferir las escalas de tiempo • Tiempos de respuesta rápidos	[1] Limitaciones computacionales de los controladores locales ■ Número mayor de enlaces de comunicación entre niveles [1] Dificultades al tratarse de control adaptativo dinámico [1] Dificultad para realizar cambios futuros no previstos

Jerárquico modificado

Características	Ventajas	Desventajas
Variedad de computadoras múltiples Leve relación amo-esclavo entre los niveles de toma de decisiones El supervisor inicia la secuencia de actividades de los subordinados Los subordinados cooperan para completar la secuencia.	[1] Todas las ventajas del control jerárquico apropiado ■ Habilidad de los sistemas locales de tener autonomía local [1] Habilidad para descargar algunas tareas de enlace en los consoladores locales	La mayor parte de las desventajas de la forma de jerarquía apropiada Problemas de conectividad • Limitaciones de los consoladores de niveles bajos [1] Mayor dificultad en el diseño del sistema de control

Jerárquica

Características	Ventajas	Desventajas
Computadoras múltiples, pero menos variedad • No hay relaciones amo-esclavo [1] Completa autonomía local [1] Toma de decisiones distribuida para la coordinación de actividades [1] Sólo bases de datos locales	Completa autonomía local Menor complejidad del software [1] Tolerancia de fallas implícita [1] Facilidad para reconfiguración y adaptación [1] Difusión más rápida de la información	En esencia debidas a limitaciones técnicas de los consoladores No hay estándares de comunicación, protocolos o sistemas operativos [1] Alta posibilidad de optimización sólo local [1] Requiere una red de alta capacidad [1] Falta de disponibilidad de software

Fuente: Dilts, Boyd y Whorms (1991), reimpreso *áelJournal ofManufacturing Systems,* mediante el permiso de la Society of Manufacturing Engineers.

2.3 Integración entre plantas

Las presiones que el mercado ejerce sobre las organizaciones industriales crearon la necesidad de llevar la integración más allá de las fronteras de una instalación específica. Este cambio se está llevando a cabo en tres formas primordiales: distintas localizaciones dentro de una organización, entre una organización y sus subsidiarias y entre la organización y los agentes externos (proveedores y clientes). El denominador común de todas estas formas es que sus sistemas de control se comunican entre sí. Esto se logra a través del intercambio, entre una computadora y otra, de datos técnicos tanto entre compañías como dentro la organización. La tecnología que implanta esta integración se conoce como intercambio electrónico de datos (EDI).

Dentro de la misma organización puede haber un enlace que conecte cierto número de funciones localizadas en distintos lugares geográficos, en ocasiones alrededor del mundo. El desarrollo del producto puede hacerse en un país, la mercadotecnia en otro y la instalación de producción encontrarse en uno más. (La compañía Medicom descrita es un ejemplo de organización de este tipo.) Las oficinas principales pueden asignar las órdenes de producción a las instalaciones de producción subsidiarias en distintos países, según la capacidad disponible, verificada a través del EDI. Por lo tanto, cada vez es más común que en toda la organización de manufactura, incluyendo a las subsidiarias, se use el mismo software.

También los enlaces de datos entre una compañía y sus distribuidores son cada vez más comunes. No sólo los datos sobre órdenes y detalles de envíos fluyen de un lado a otro, sino que los distribuidores que tienen contratos de abastecimiento a largo plazo pueden tener acceso a sus archivos de inventario y reabastecerlo cuando sea necesario. Las ventajas son evidentes: el tiempo de entrega se reduce y los costos de papeleo y los retrasos del proceso se eliminan.

La comunicación por computadora con los clientes está ganando popularidad. Por ejemplo, el acceso al software de clientes del diseño ayudado por computadora (CAD) permite obtener especificaciones del producto actualizadas y fabricarlo de acuerdo con ellas.

Los enlaces de datos entre el productor y sus proveedores y clientes proporciona un ejemplo del creciente alcance de los negocios en la era de los sistemas controlados por el mercado (capítulo 2, figura 2-4). Este aumento en el nivel de integración no debe sorprender en tiempos en que la red mundial WWW es parte de la vida diaria.

2.3.1 Planeación y control de la producción integrados

La nueva tendencia en el diseño de sistemas de producción es hacia los sistemas integrados, éstos pueden lograrse a través de tres enfoques principales del diseño: manufactura celular, manufactura flexible y manufactura integrada por computadora. Es natural que un sistema de producción diferente necesite un enfoque distinto para la planeación y control de la producción. Como un sistema de producción integrado tiene un alcance más amplio, debe tenerlo también su sistema de planeación y control (PCP). La diferencia entre la PCP tradicional y la PCP integrada no se limita al alcance. La PCP tradicional se veía sólo como una herramienta de producción. La PCP integrada es mucho más que eso. Es un concepto global, con una filosofía que lo apoya y lo impulsa, y un conjunto de herramientas para implantarlo. La mayor parte de las herramientas están basadas en una computadora. En un principio, los procesos de los sistemas de producción integrada y los de PCP integrada estaban totalmente desconectados. En retrospectiva, si se intenta filosofar sobre esto, los dos procesos tienen una relación estrecha: sin los siste-

mas de producción integrada no habría necesidad de PCP integrada, y sin la PCP integrada los sistemas de producción integrados sólo podrían lograr objetivos limitados.

Existen tres grandes enfoques a la PCP integrada: los sistemas empujar, los sistemas jalar y los sistemas de cuello de botella. Irónicamente, todos surgieron como herramientas de producción y después evolucionaron en sistemas de PCP. El precursor de los sistemas empujar fue una herramienta llamada planeación de requerimientos de materiales (MRP), desarrollada en 1974 por Joseph Orlicky de IBM. El precursor de los sistemas jalar fue el sistema *kanban*, introducido a finales de los 60 en la Toyota por Taichi Ohno. El origen de los sistemas cuello de botella se puede atribuir a Eli Goldratt, un físico israelí, quien introdujo la tecnología optimizada (OPT) a mediados de los 70. Aún más, en realidad los tres enfoques representan integración global. Los sistemas empujar se originaron en Estados Unidos; los sistemas jalar, en Japón y los sistemas cuello de botella en Israel, una integración de tres continentes. En las siguientes secciones se presentan con detalle estos tres enfoques.

SECCIÓN 2 EJERCICIOS

10.1. ¿Cuáles son las dos características principales de la integración?

10.2. ¿Cuál es la diferencia entre integración lateral e integración vertical?

10.3. Proporcione tres ejemplos de flujo de información y enlaces para cada uno de los siguientes departamentos:

Ventas - manufactura
Servicio a clientes – manufactura
Servicio a clientes - ventas
Control de calidad – manufactura
Manufactura - costeo

10.4. Defina el "síndrome de barreras caídas"

10.5. Defina "arquitectura de control"

10.6. ¿Cuáles son las formas básicas de la arquitectura de control?

10.7. ¿Cuáles son las ventajas y las desventajas de cada forma de control?

10.8. Clasifique las siguientes operaciones según los niveles de control adecuados (planta, célula, máquina):

Distribución de órdenes a producción
Manejo de materiales dentro de las células
Secuenciación de partes
Cambio de herramental
Carga de partes a las máquinas

10.9. Analice los siguientes dos esquemas:

a) La ruta es fija y la secuencia de producción se conoce de antemano. Se tienen máquinas idénticas del mismo tipo y en tiempo real se asigna una parte a una máquina con la línea de espera más corta.

b) La determinación de las rutas es dinámica y la secuencia de operación se puede cambiar. Las partes se asignan a las máquinas según la longitud de la cola, las fechas de entrega y la cantidad que ya se ha producido.

¿Qué tipo de arquitectura de control es adecuada para cada escenario? ¿Por qué? ¿Cuál es el trueque al usar cada arquitectura de control? ¿Por qué?

10.10. Citrus Ltd. es un fabricante de jugo concentrado y extracto de frutas. Una fuerte competencia y los cambios en la estructura del mercado han generado presión sobre la administración para reducir

costos. Después de estudiar varias alternativas, la administración identificó el almacén de materia prima como una fuente significativa de costos que no agregan valor. La materia prima se almacena en barriles, y se colocan cuatro de ellos en cada tarima. Se usan montacargas para transportar las tarimas a su destino. El almacén tiene refrigeración a -18°C. Un consultor externo hizo las siguientes observaciones:

- Los pedidos de almacenaje y retiro se manejan a mano. No existe un sistema para administrar la localización, controlado por computadora.
- Los programas de producción se transfieren al almacén sólo dos días antes. Entonces, no es po sible optimizar los pedidos de almacenamiento y retiro.
- La materia prima se almacena en otros lugares (rentados), donde la utilización del almacén lo cal es menor al 80%.
- En ocasiones, los artículos que se deben mover con rapidez se almacenan en lugares externos.
- Los embarques de materia prima importada no se conocen con anticipación. Entonces no es po sible optimizar los requerimientos de almacenaje.
- No se puede implantar un seguimiento porque no hay documentación de la asignación de mate ria prima a los lotes de producción.
- Las pruebas de control de calidad se realizan al azar sobre la materia prima almacenada. Es difí cil encontrar los lotes requeridos, que a su vez, es causa de pérdida de tiempo y recursos.

Conteste las siguientes preguntas:

á) Clasifique estas observaciones como síntomas y problemas.
b) ¿Qué problemas son locales del almacén y cuáles no lo son? ¿A qué se debe su conclusión?
c) ¿Cómo puede resolver estos problemas (¡si es que puede!) la integración de la información? Proporcione ejemplos.

3 SISTEMAS EMPUJAR

3.1 Filosofía

Los sistemas empujar tienen una componente técnica, al igual que conceptos administrativos esenciales. La componente técnica se refiere a la manera en que se mandan los trabajos al sistema de producción y su flujo a través del sistema. Como tal se puede ver como una herramienta de control de materiales, según se describe en la figura 10-5.

FIGURA 10-5
Sistemas empujar (programación hacia atrás)

Se determina una fecha de entrega para cada trabajo, ya sea a partir de mercadotecnia o de su siguiente operación. Los trabajos se mandan en una fecha de inicio, que es la fecha de entrega menos el tiempo de entrega. Se hace notar que el tiempo de entrega es un parámetro de planeación determinístico. El tiempo de flujo es el tiempo real que toma el material en atravesar el sistema de producción; es variable y se quiere reducir esa variabilidad cuanto sea posible. Una vez enviado, el trabajo fluye de una operación a otra a través del sistema de producción sin importar lo que pase adelante de él. De aquí el término **empujar** para este método; se empujan los trabajos a través del sistema de producción. Otro nombre para los sistemas empujar es **sistemas basados en el programa,** ya que el programa empuja la producción.

El concepto administrativo detrás de los sistemas empujar es el de **planeación central.** Las decisiones sobre cómo deben procesarse las órdenes de producción son centralizadas. Estas decisiones se empujan después a niveles más bajos de la organización y deben cumplir con el programa central generado.

3.2 Sistemas MRP II

.Los términos *sistema MRPII* y *sistema empujar* con frecuencia se usan en forma indistinta. Como concepto, MRP II (al igual que otros métodos de PCP integrada) representa un esfuerzo hacia el logro de la excelencia en la manufactura. Para ser más específicos, el MRP II puede verse como un método para la planeación efectiva de todos los recursos de una organización de manufactura. Una definición formal es: *MRP II es un sistema de planeación, programación y control basado en computadora. Proporciona a la administración una herramienta para planear y controlar sus actividades de manufactura y las operaciones de apoyo, obteniendo un nivel más alto de satisfacción del cliente y reduciendo, al mismo tiempo, los costos.* El MRP II es un crecimiento del MRP. En un principio, el MRP era una herramienta computarizada para programar y ordenar los materiales. Más tarde, se usó para planear de nuevo, actualizando las fechas de entrega de las órdenes en la planta; esto dio como resultado un desempeño mejorado de las ventas y de la planta. Siguieron algunos intentos para mejorar la planeación de producción, el programa maestro de producción (MPS) y los pronósticos de demanda. Con un mejor MPS incorporado el MRP, éste se convirtió en un sistema MRP de ciclo cerrado. La siguiente etapa fue mejorar la planeación de la capacidad en distintos niveles y agregar habilidades de simulación. Esto hizo posible generar planes financieros basados en el proceso de planeación MRP. Así, el MRP es convirtió en un sistema para toda la compañía, el cual maneja las operaciones de planeación y control y dejó de ser sólo una herramienta para programar el flujo de los materiales.

Wight (1984) propuso llamar al nuevo sistema planeación de recursos de manufactura, con el acrónimo MRP II. El II era necesario para distinguirlo de la planeación de requerimientos de materiales (MRP). Este nombre subsistió puesto que hacía hincapié en el mayor alcance y mostraba su herencia del MRP. La figura 10-6 muestra un sistema MRP II de ciclo cerrado. Es un sistema mucho más amplio que el MRP. Se profundizará en él en la siguiente sección.

3.3 Componentes del sistema

Puede decirse que un sistema MRP II tiene tres componentes principales: planeación administrativa, planeación de operaciones y ejecución de operaciones. La alta administración es res-

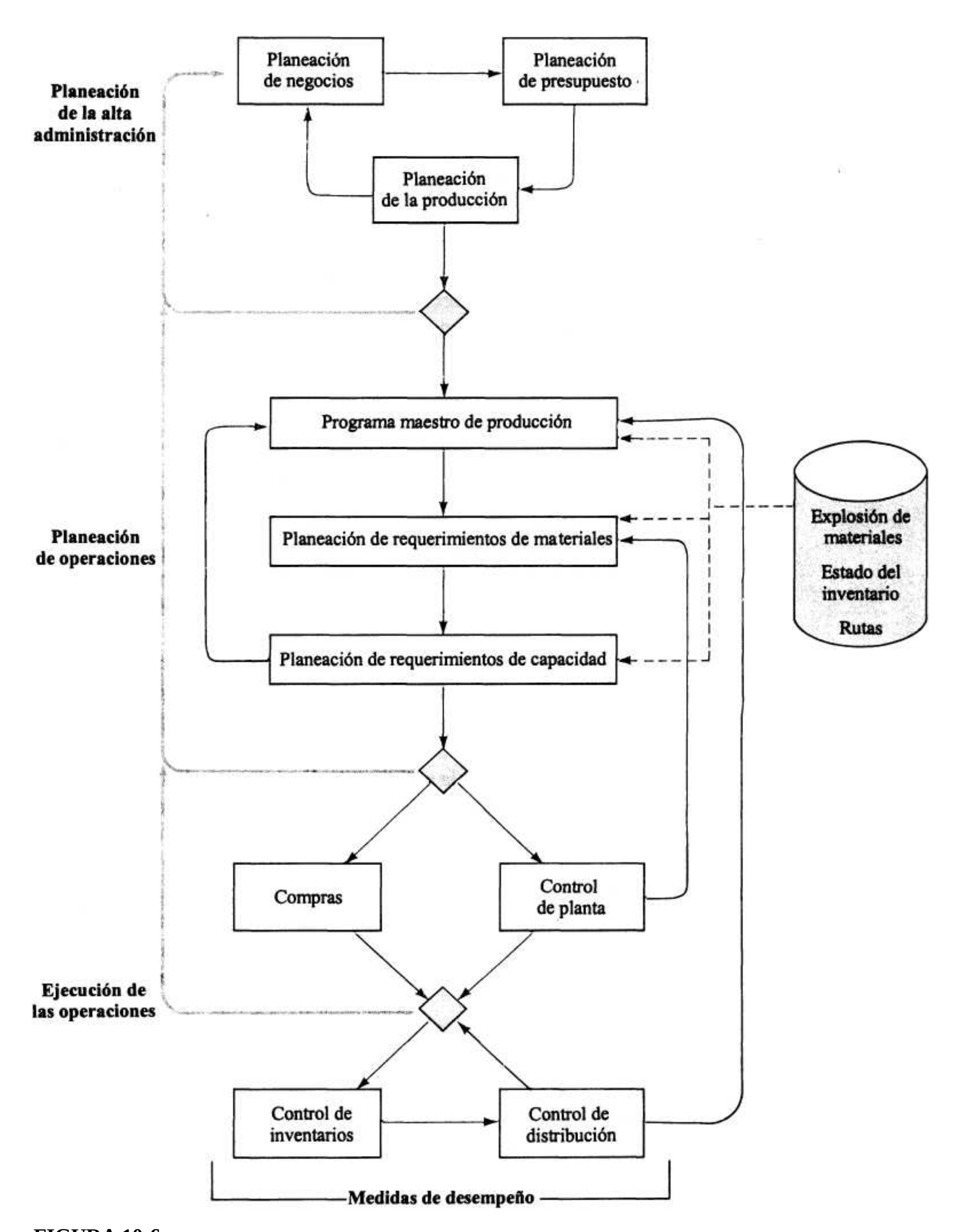


FIGURA 10-6
Funciones y ciclos de retroalimentación en un sistema MRP II de ciclo cerrado (Riggs, copyright © 1987. Reimpreso con permiso de John Wiley & Sons, Inc.)

ponsable de la planeación administrativa, las unidades de personal de apoyo manejan la planeación de las operaciones y el personal de manufactura se encarga de la ejecución. Cada componente tiene puntos de verificación para proporcionar retroalimentación. Esta retroalimentación determina si los recursos globales son adecuados, si la planeación de las operaciones está completa y la conformidad de la ejecución con los planes, y permite que la administración responda a cambios en las condiciones.

La estrategia de la compañía es la base de las actividades de la componente del MRPII que corresponde a la alta administración. La estrategia se traduce en objetivos de negocios para el año actual. Esto, a su vez, se convierte en la entrada para el proceso de planeación de ventas, en el cual se planean las ventas por cantidad de producto y por volumen de dinero. Le sigue la planeación de la producción que es, en esencia, un plan de entregas para manufactura. El plan de producción implica un compromiso que cada función de la organización debe adoptar.

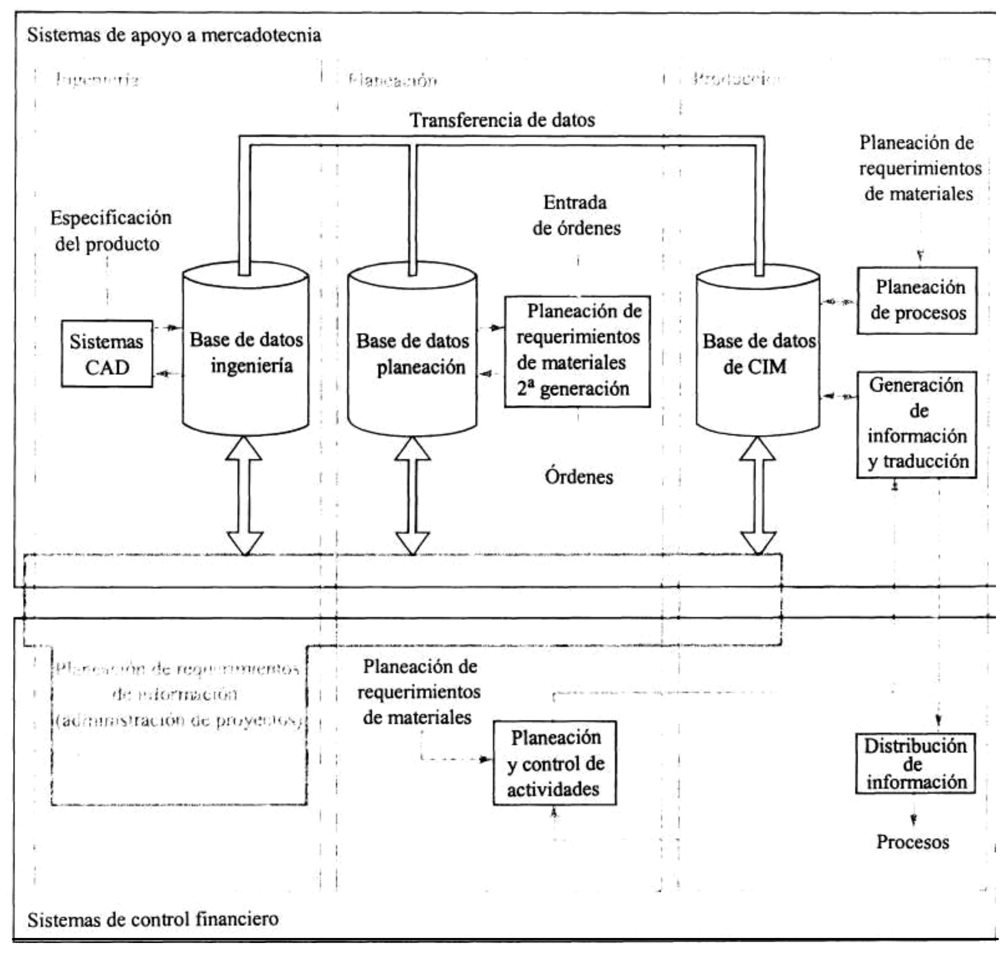


FIGURA 10-7

Modelo genérico de CIM [tomado de Bolay *et al* (1991), reimpreso con permiso de Alcatel Telephone, Francia]

La segunda componente, planeación de la operación, es la función del MRP que se estudió con detalle. La salida es un programa de órdenes que se manda a la componente de ejecución.

La sección de ejecución es donde se lleva a cabo la acción, es decir, donde el producto se fabrica. La materia prima se compra, el material fluye y el equipo de producción se controla, la calidad se asegura, se da seguimiento a la hora de mano de obra, etcétera. Los problemas en la planta se retroalimentan a la componente de MRP. La evaluación del desempeño proporciona retroalimentación para las acciones correctivas en la planeación de los negocios.

El modelo de MRP II presentado es de naturaleza general. Puede incluir más o menos componentes que las mostradas (vea la sección 3.4). Sin embargo, se requiere el módulo de MRP; es el motor que impulsa todo el sistema. Así, el MRP no perdió su importancia con la llegada del MRP II.

3.4 Integración y software

Por una buena razón se analizan juntos la integración y el software. Recuerde que la integración de la información es una componente de la esencia de la integración. El MRP II, por su nombre, es un sistema de información (o, mejor aún, un sistema de información de manufactura). Todavía más, la forma en que se desarrollaron los sistemas MRP II y por las limitaciones técnicas de hardware y software que existían durante su desarrollo, un sistema MRP II en realidad consiste en varios módulos separados que se enlazan (figura 10-6). Cada módulo realiza una función o actividad distinta dentro de la organización. Es evidente que la integración de la información está implícita en la estructura del MRP II. Como tal, el MRP II puede ayudar en forma importante a romper las barreras funcionales dentro de la organización.

El software es el corazón del MRP II. La integración de la información ocurre a través del software. Por lo tanto, el software y la integración van de la mano en el MRP II. La vida de la integración depende del número de módulos usados. Por ejemplo, Nvision, una compañía de televisores de alta definición, informa que usó MRP II en un principio con más de 18 módulos integrados (Jasany, 1991). Los módulos son cuentas por pagar, cuentas por cobrar, conciliación bancaria, contabilidad general, control de inventarios, órdenes de compra, lista de materiales, estimaciones, documentación de fábrica, requerimientos netos (planeación de requerimientos, planeación de la capacidad, planeación de recursos y programación del trabajo), trabajo en proceso, seguimiento de lotes y costo del trabajo. Éste es un arreglo impresionante de actividades integradas a través del MRP II.

Existe otro aspecto en el papel del MRP II como integrador de información. Abre oportunidades para una integración mucho más amplia dentro de la organización de manufactura. Por ejemplo, Alcatel, un fabricante multimillonario francés en el área de las telecomunicaciones, informa sobre el uso de MRP II como un elemento primordial en el logro de CIM (Bolay *et al*, 1989). El modelo genérico de la compañía para la manufactura integrada por computadora se muestra en la figura 10-7. El hecho de que CIM se logre todavía queda por verse. El punto importante es que MRP II puede comunicarse con otros sistemas, como diseño y manufactura asistidos por computadora, control de calidad y mantenimiento, lo que lleva a un grado más alto de integración.

Algunas veces el poder de integración del MRP II va más allá de las fronteras de la compañía. Nissan trabaja con un sistema MRP II que proporciona a varios de sus proveedores los programas por hora. Su proveedor de asientos, por ejemplo, tiene su sistema MRP II enlazado con el de Nissan ("Dialogues", 1987).

Como ya se dijo, el software es el corazón del MRP II. Existen más de 200 paquetes comerciales disponibles. Éstos corren en computadoras grandes, minicomputadoras, microcomputadoras y estaciones de trabajo individuales. La mayor parte de los paquetes están diseñados para aplicaciones industriales genéricas. Sin embargo, cada día aparecen paquetes para industrias específicas, ya que cada una tiene necesidades particulares que el MRP II debe cubrir. Las compañías farmacéuticas tienen requisitos de seguimiento, la industria del espacio aéreo debe poder cumplir con requerimientos de normatividad y los fabricantes de plásticos necesitan saber en qué punto están las formulaciones de materiales complejos. Si es posible, debe evitarse volver a programar un paquete genérico para adecuarlo a necesidades específicas. Puede crear problemas y no será fácil introducir una versión de actualización. La regla señala que es mejor tener un paquete que funciona al 100% que cumple con el 90% de las necesidades que tener un paquete que no funciona que cumple con el 100% de las necesidades. Los ejemplos de software comercial disponible incluyen CONTROL (CINCOM) y AMAPS (Dun & Bradstreet) para computadoras grandes, MAPICS XA (Marcam Corp.) para minicomputadoras y muchos para estaciones de trabajo y microcomputadoras. Puede encontrar una lista completa en "Buyer's Guide" (1995). El cuadro 10-1 es un ejemplo de un paquete de microcomputadora típico.

CUADRO 10-1

SOFTWARE MRP II PARA PC *(Manufacturing Engineer Software, 1990)*

MANUFACTURING PM™

Soporte de hardware:
IBM AS/400, System/36, Serie PS/2; hardware con base en MS-DOS
Sistemas operativos:
OS/400, SSP, OS/2, MS-DOS
Lenguajes fuente:
RPGII/III/400 Número de
clientes/usuarios:
250
Descripción:

Manufacturing PM es un sistema de manufactura integrado de circuito cerrado en línea, que incluye: administración de órdenes de clientes; base de datos de productos; control de planta y de inventarios; compras; costeo de planta y de inventarios; programa maestro de producción; planeación de requerimientos de materiales; planeación de requerimientos de capacidad; costeo estándar de producto; localizador de artículos almacenados; cuentas por pagar; contabilidad general, y cuentas por cobrar. También incluye un texto de ayuda completo, documentación en línea, habilidades para Alpha Search y, además, un generador de requerimientos de disco en línea. Está disponible un programa de demostración que contiene una muestra del código fuente y un código de objetos completo.

Fuente: Institute of Industrial Engineers, 25 Technology Park/Atlanta, Norcross, GA 30092, Copyright © 1990. Reimpreso con permiso.

El software de MRP II está en constante cambio. Algunos intentos recientes para darle otro nombre sin cambiar su naturaleza han tenido aceptación. Dos de los nombres más aceptados son ERP y COMMS (Turbide, 1995).

ERP son las siglas de *enterprise resource planning* o planeación de recursos de la empresa; el nombre busca describir la siguiente generación de sistemas MRPII. La definición del sistema incluye funcionalidad y nuevas aplicaciones como mantenimiento, calidad, servicio de campo, apoyo de mercadotecnia y varios requerimientos tecnológicos como configuración del producto y control de cambios de ingeniería. Un paquete de este tipo que gana popularidad es TRITÓN (Baan Intl.).

COMMS viene de *customer-oriented manufacturing management systems* o sistemas de administración de la manufactura orientados al cliente. Su definición es similar a la de ERP. Contiene tres niveles: planeación, ejecución y control. El nivel de ejecución cae dentro del tema de *sistemas de ejecución de manufactura* e incluye programación de planta, calidad y manejo de materiales.

Estos dos nuevos sistemas deben verse como eventos importantes en la trayectoria del desarrollo de MRP II. Las aplicaciones serán cada vez más completas y agregarán más áreas de negocios. La necesidad de un mayor alcance del negocio generará habilidades más poderosas de administración de la distribución, de intercambio electrónico de datos (EDI) y de administración coordinada de multiplantas en varios lugares.

El costo de un paquete de MRP II puede comenzar en varios cientos de dólares por un software sencillo para microcomputadora y puede llegar hasta varios cientos de miles de dólares en el caso de las computadoras grandes. La característica de modularidad del MRP II permite comprar de inmediato los módulos requeridos y después agregar otros. Sin embargo, debe hacerse una advertencia: el costo del paquete, en especial para minicomputadoras y computadoras grandes, no representa la inversión total de instalar el sistema MRP II. Existen costos ocultos que en ocasiones son mayores que el costo de compra del paquete. En general, caen en tres categorías (Bolay *et al*, 1989):

- Costos de reprogramación: convertir un paquete genérico en uno hecho a la medida, aun que no se recomienda, a veces se hace.
- Costos de interfases: el software de MRP II puede tener que enlazarse con módulos o bases de datos existentes. Esto puede representar un costo sustancial.
  Costos de capacitación: la introducción de un sistema MRP II requiere mucha capacitación. Por ejemplo, ALCATEL Corporation informa que la introducción del MRP II en su subsidiaria de Noruega requirió capacitar a más de 400 personas con un costo alto.

Debido a que la instalación de un sistema MRP II puede representar un movimiento estratégico importante, así como una inversión fuerte, el cuadro 10-2 proporciona algunas sugerencias de los expertos.

CUADRO 10-2

COMPRA DE SOFTWARE DE MRP II: ALGUNAS SUGERENCIAS DE LOS EXPERTOS (Kreisher, 1988)

El software de MRP II afectará todas las etapas de su negocio de manufactura, por lo que es mejor estar preparado para hacer la tarea. Esto parece sentido común, pero la mayor parte de los proveedores de software con los que se ha tenido contacto dicen que debe hacerse mucho hincapié en esto. Los precios de los sistemas instalados comienzan en 50 000 dólares y los costos de millones son comunes. De manera que es sencillo observar por qué se requiere reflexionar antes de actuar.

CUADRO 10-2
(continuación)

Se presenta una lista de los aspectos que deben considerarse antes de invertir en un sistema. Estas recomendaciones se extrajeron de procesadores que usan sistemas MRP II, de los proveedores de software y de los consultores independientes que trabajaron en la instalación en procesos de plásticos.

1. **Organizarse:** primero debe decidir qué persona o grupo se hará responsable de la instala ción del sistema. La clave es eliminar duplicidad de esfuerzo, un error común y costoso. La mayoría de los expertos piensan que es mejor establecer un comité que incluya perso nal de todas las áreas de manufactura que serán afectadas. Esto incluye personal del depar tamento de control de inventarios, compras, control de calidad y, por supuesto, produc ción. También están de acuerdo en que es una buena idea seleccionar una "persona dedicada" como líder del comité y que quizá la mejor persona para el puesto sea alguien de producción.

2. **Contratar un consultor:** para compañías que no son suficientemente grandes para dedi car a un número significativo de personas a la tarea, tanto los proveedores como los usua rios pensaron que era buena idea captar la ayuda de un consultor. Esto puede eliminar gran parte del trabajo, proporcionar una idea inmediata de los costos y comenzar mucho más rápido.

3. **Hablar con otros usuarios:** casi cualquier proveedor de software respetable lo pondrá en contacto con procesadores de plásticos que estén usando su sistema de MRP II. De nuevo, esto le dará una idea clara de lo que tiene enfrente y seguro tendrá una larga lista de pre guntas para el proveedor.

4. **Preguntar sobre actualizaciones:** casi no hay nada que provoque más temor que la idea de que el sistema puede ser obsoleto aún antes de comenzar a trabajar. Algunas preguntas sobre actualizaciones aclararán el asunto. La mayoría de los proveedores actualizan su sis tema en forma periódica y cuentan con un procedimiento en el contrato de compra para proporcionar estas actulizaciones. Esto puede tener un costo.

5. **Preguntar sobre capacitación:** muchos proveedores darán capacitación a algunos usua rios en sus instalaciones, pero no es probable que la proporcionen a más de 10 usuarios. Esté preparado para que una persona quede totalmente familiarizado con el sistema, para que él o ella puedan capacitar a otros. Tal vez el proveedor proporcione capacitación adi cional en su instalación. La capacitación es su oportunidad para ser creativo: un procesa dor, Gel Inc., en Livonia, Mich., utilizó un sistema de escuela pública para capacitar a sus empleados sobre computación básica y análisis estadístico.

6. **Buscar flexibilidad:** lo que necesita del MRP II puede cambiar. Busque un sistema que pueda crecer con su operación. Esto se refiere a software y hardware. Quizá no quiera in vertir en un sistema completo de una vez, entonces encuentre un paquete que sea total mente modular. De esta manera podrá expandir el sistema sin sacrificar el desempeño. También, busque un paquete que se pueda correr en una microcomputadora, en una mini-computadora o en una computadora grande sin reprogramación costosa.

7. **Obtenga el programa fuente:** el código fuente de un programa de computadora es la lis ta de instrucciones que hace que el software opere. Sin él, la actualización de su propio sis tema es imposible. En el improbable caso de que su proveedor cierre el negocio, necesitará

el programa fuente para actualizar el sistema usted mismo; aunque esto puede ser difícil, aun con el código. Virtualmente todos los proveedores respetables tienen alguna forma de proporcionar el código fuente para el caso de emergencia. Esto, por lo general, se logra poniendo el código en depósito.

***Fuente:* reimpreso con permiso de *Plastics Technology*, julio de 1988.**

3.5 Aplicaciones industriales

Existen numerosas aplicaciones del MRP II en la industria —demasiadas para enumerarlas—. Se presenta una guía de implantación, un ejemplo de aplicación y los resultados del uso del MRP II.

Se pueden encontrar muchos consejos en la literatura para una implantación exitosa del MRP II. Un denominador común es la necesidad del compromiso de la alta administración. La introducción del MRP II en una organización es un cambio importante, y para que tenga éxito, la administración tiene que respaldarlo por completo. Más allá del compromiso se encuentran distintas maneras de lograr una implantación con buenos resultados. El cuadro 10-3 presenta una que funcionó para la Raymond Corporation, fabricante de equipo y sistemas de manejo de materiales fundada en 1920. Observe el enfoque del equipo de funciones cruzadas que este procedimiento implica. El cuadro 10-4 contiene un análisis del uso de MRP II en Huck Manufacturing.

CUADRO 10-3

MRP II EN RAYMOND COMPANY (Quinlan, 1989)

HACERLO DE LA MANERA CORRECTA

- Forme un equipo de proyecto administrativo para atacar los problemas. Incluya personas de todas las funciones importantes de la compañía.
- Obtenga la ayuda de un consultor. También visite y observe otras compañías que hayan pasado por la misma experiencia.
- Fije la responsabilidad del avance y establezca procedimientos para medir el desempeño.
- Cree un espíritu de equipo; elimine la "mentalidad egoísta". Haga que el personal de la planta y el administrativo se comuniquen.
- Registre y analice los beneficios en costos conforme el programa avanza. Si un procedimiento dado no crea beneficios, hágalo a un lado e intente algo más. No recolecte datos sólo por tenerlos.
- Limpie sus bases de datos, en especial aquellas de costos de mano de obra, lista de materiales e inventarios. El mejor y más costoso sistema de cómputo hará que salga sólo basura si se le dan datos obsoletos, inexactos o incompletos.
- Por último —éste debe ser el último paso— evalúe media docena de sistemas de software/hardware. El software para MRP II debe satisfacer alrededor del 90% de sus necesidades identificadas.

CUADRO 10-3
(continuación)

"El aspecto más crítico para el éxito" —dice Stickler, el gerente de producción—, "es el deseo de cambio. Si no quiere cambiar, sólo perderá tiempo y dinero. Ningún sistema de cómputo puede resolver sus problemas por sí sólo".

***Fuente: Tooling and Production Magazine,* octubre de 1989. Reimpreso con permiso.**

CUADRO 10-4

MRP II EN HUCK MANUFACTURING
("Technology Update", 1989)

MRP II ELEVA LAS GANANCIAS DE HUCK

Huck Mfg Co, Irvine, CA, fabrica broches y equipo de instalación de los broches para las industrias aérea, automotriz, ferroviaria y otras, y usa en su equipo partes de metal fabricadas. La compañía opera plantas en Estados Unidos, Canadá, Francia e Inglaterra, y distribuye a todo el mundo.

En 1984, Huck decidió descentralizar las operaciones en computadora más importantes en sus dos divisiones de broches y en su división de equipo. Los objetivos principales eran reducir inventarios y aumentar la eficiencia en la manufactura.

Al buscar un sistema, Huck tenía tres criterios en mente:

1. El software correría en forma descentralizada. Cada planta tendría su copia del software y su propia computadora principal.
2. El software sería lo suficientemente flexible para manejar las diferencias en las operacio nes de negocios entre las plantas.
3. El sistema de computación estaría diseñado alrededor de conceptos de MRP II.

Primero, cinco proveedores de software hicieron presentaciones de un día a la administración de Huck. De los cinco, se seleccionaron dos para evaluaciones más profundas. El sistema elegido fue MANMAN MRP II de ASK Computer Systems Inc, Mountain View, CA. Huck eligió el equipo Hewlett-Packard como plataforma de operación.

Durante el proceso de evaluación, Huck formó un comité supervisor que coordinaría la instalación del MRP II en las tres divisiones. La capacitación y la educación recibieron una alta prioridad.

Según los resultados obtenidos, la implantación más exitosa ocurrió en la división de broches en la planta de Waco, TX. Ahí los administradores del proyecto incorporaron el uso del MRP II a las rutinas diarias.

"En Waco, las ventas subieron a más del doble desde que comenzó la operación del sistema MRP II", informa Harold Borne, el administrador del sistema de información administrativo. "Sin embargo, la división no ha tenido que aumentar su personal administrativo en una cantidad significativa".

Por otra parte, se han realizado mejoras importantes en los envíos a tiempo y la rotación del inventario. La exactitud en el cálculo del inventario, el programa maestro de producción, la planeación de requerimientos de materiales y la lista de materiales ha mejorado de manera sustancial.

Ahora, la exactitud en el cálculo del inventario ha mejorado al grado de que la división pudo sustituir un inventario físico anual con un sistema de cálculo cíclico. Todavía más, los márgenes de ganancias han aumentado en gran medida desde que se implantó el sistema MRP II.

"No hubiera sido posible duplicar el nivel de negocios en Waco de no haberse implantado el sistema MRP II", concluyó Borne.

Fuente: Tooling and Production Magazine, octubre de 1989. Reimpreso con permiso.

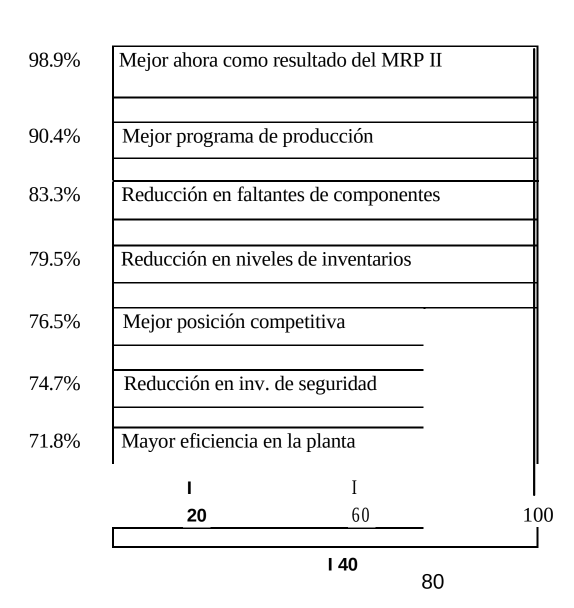



FIGURA 10-8
Beneficios del MRP II ("News and Trends", 1988) (reimpreso con permiso de *Modern Materials Handling Magazine,* abril, 1988, copyright© 1988 por Cahners Publishing Company)

Los sistemas MRP II se han usado ya durante algunos años; se han tenido éxitos y fracasos. El éxito o el fracaso depende del entorno de manufactura dentro del cual opera el sistema. Una encuesta llevada a cabo por Business Education Associates ("News and Trends", 1988) mostró que de 400 compañías que contestaron, 53% dijo que habían tenido éxito con el MRP II. Dentro de este grupo, los beneficios del MRP II después de un año tienen la distribución que se muestra en la figura 10-8. Como un ejemplo específico de los beneficios del MRP II, Alcatel Corporation informa lo siguiente:

Tamaño de lote de la orden:	reducción de 40%
Tiempo de entrega total:	reducción de 50%
Inventario: Trabajo en	reducción de 60%
proceso: Fechas de entrega:	reducción de 75%
	98% a tiempo

Una cuestión es cierta; el MRP II es un contendiente poderoso para la componente de PCP integrada de los sistemas de producción integrados.

SECCIÓN 3 EJERCICIOS

10.11. ¿Qué es lo que impulsa el envío de órdenes a producción en un sistema empujar?

10.12. Defina el término *tiempo de entrega.* ¿Cuál es la relación entre el tiempo de flujo y el tiempo de entrega?

10.13. Se obtuvo una muestra de tamaño 6 para el tiempo real que pasa un trabajo en la planta. Los resultados (en días) fueron: 5,6,7,5,6 y 5. ¿Cuál sería un valor razonable para el tiempo de entrega de manufactura? ¿Cuáles son las distintas consideraciones para establecer ese tiempo de entrega en este caso?

10.14. Una suposición importante para el MRP es que el tiempo de entrega es fijo. ¿Cuáles son las implicaciones de un tiempo de entrega no constante (por fallas de máquinas, variabilidad del proceso, etcétera)?

10.15. Analice el siguiente escenario: el tiempo de entrega con frecuencia se establece un poco más largo de lo necesario. Esto se hace con el fin de compensar eventos inesperados y evitar faltantes. Como resultado, los trabajos tienden a pasar más tiempo en la planta, bloqueándola, y la determinación del tiempo de entrega adecuado es más difícil. Cuando se bloquea la planta, se establecen tiempos de entrega aún más largos, puesto que no hay manera de saber cuál es el tiempo de entrega real.

a) ¿Cuál es la relación entre el tiempo de entrega y el trabajo en proceso?
b) ¿Qué hace que el tiempo de entrega por fin se estabilice?
c) ¿Cuáles son las posibles causas de este problema?
d) Hay alguna manera de evitar este círculo vicioso?

10.16. ¿Cuál es la diferencia entre MRP II y MRP?
10.17. ¿Cuáles son los costos directos e indirectos de instalar un sistema MRP II?
10.18. El concepto clave detrás de los sistemas empujar es la planeación central. Explique por qué.
10.19. ¿Qué tipos de retroalimentación necesita un sistema MRP II para operar?
10.20. ¿Qué aspectos de una organización de manufactura están integrados a través de un sistema MRP II?
10.21. ¿Qué aspectos de un sistema de manufactura se espera que mejoren como resultado de la instala ción de un MRP II?

4 SISTEMAS JALAR

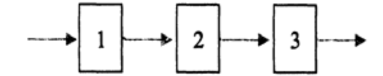
4.1 Filosofía

De la misma manera que los sistemas empujar, los sistemas jalar tienen una componente técnica y un concepto administrativo. La componente técnica es un derivado de una técnica de control de la producción desarrollada en Toyota Motor Company en Japón, a principios de los 60. En general, su origen se atribuye a Ohno y Shingo, quienes trabajan en Toyota en ese tiempo. La técnica se dio a conocer como el *sistema de producción Toyota.* El objetivo es proporcionar una técnica de control sencilla que reduzca el tiempo de entrega y el trabajo en proceso. Kan-**ban,** la palabra japonesa para **tarjeta,** es la herramienta original que se usó para lograr estos objetivos. Este enfoque resalta la habilidad de Toyota para cumplir con la demanda de sus clientes de los diferentes modelos de automóviles con un retraso mínimo, es decir, con flexibilidad máxima.

Existe una diferencia sutil entre los sistemas empujar y los sistemas jalar. Un sistema empujar controla el envío de las órdenes de trabajo, mientras que el sistema jalar controla la planta. Para ser más específicos, los sistemas empujar controlan la producción (al controlar el envío de órdenes) y miden el trabajo en proceso, mientras que los sistemas jalar controlan el trabajo en proceso y miden la producción (Spearman, 1992).

Al pasar el tiempo, la técnica **jalar** evolucionó a un concepto administrativo mucho más amplio. Con frecuencia se le da el nombre de justo a tiempo (JIT) o sistema JIT integrado. Esto ya no es un "sistema de producción para fabricar el tipo de unidades necesarias, en el tiempo necesario y en las cantidades necesarias" (Monden, 1981), más bien es un concepto que debe adoptarse. Abarca no sólo los sistemas de producción sino los clientes y los proveedores junto con el control de la calidad y del flujo del trabajo. El alcance se amplía para incluir la eliminación del desperdicio de cualquier tipo o forma (inventario, productos defectuosos, tiempos de entrega largos, entregas retrasadas y más). Esto hace que el JIT integrado sea una parte de una estrategia de negocios corporativa al igual que una herramienta de PCP integrado.

FIGURA 10-9
Interdependencia secuencial



Para aclarar la terminología *Jalar* es un principio que gobierna el flujo de materiales. *Kanhan* es un método manual para implantar el sistema jalar. JIT se refiere a todo el sistema, al control del flujo de materiales y a una filosofía administrativa. Sin embargo, en ocasiones en la industria, el JIT puede no querer decir otra cosa que otro nombre para un sistema *kanban.*

4.2 El principio de jalar

Los sistemas *jalar* existen desde hace muchos años y han surgido muchas definiciones para ellos. La que se piensa que capta el verdadero espíritu del concepto jalar es la **administración de la interdependencia.** Una característica que distingue a un sistema jalar es su enfoque para manejar la interdependencia, en particular en las operaciones de manufactura (Arogyaswamy y Simmons, 1991).

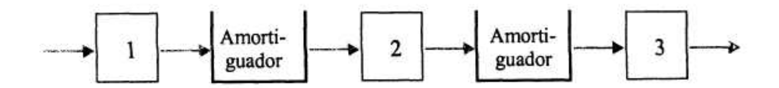
Con el fin de fabricar un producto, el trabajo se divide en tareas individuales, por lo común procesos de manufactura o de ensamble. Estas tareas son interdependientes y deben coordinarse. Thompson[2] define varios tipos de interdependencias, dos de los cuales, el secuencial y el recíproco, son relevantes para la planta de producción.

La interdependencia secuencial se muestra en la figura 10-9. La salida de cada operación depende de la entrada de una (o más) operaciones anteriores, es decir, la operación 2 depende del material que fluye de la operación 1, y la operación 3 depende de la operación 2. Si se detiene la operación 1 afecta todas las operaciones que le siguen. Sin embargo, si la operación 3 se detiene, no se afectan las operaciones anteriores; continuarán el procesado del material y esto creará inventario en proceso, hasta que se llenen los "amortiguadores". Para reducir la interdependencia entre las anteriores y posteriores y mantener la salida de la línea de producción, es común introducir amortiguadores entre las operaciones (figura 10-10). Estos amortiguadores separan las operaciones y eliminan la interdependencia a menos que el amortiguador se vacíe cuando se detiene una máquina anterior. Aun así, si ocurre una falla en la operación 2, la operación 1 es insensible a eso y seguirá procesando y aumentará el inventario en el amortiguador que le sigue.

La interdependencia recíproca se muestra en la figura 10-11. Es recíproca porque existe una relación en dos sentidos entre las operaciones 1 y 2 y entre las operaciones 2 y 3. En esta relación, cada operación afecta y es afectada por una o más operaciones, lo que requiere un ajuste mutuo para su coordinación (Thompson, 1967). Un paro en una operación anterior afectará las operaciones posteriores y viceversa.

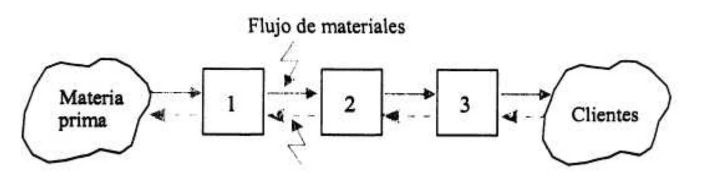
La relación en dos sentidos mostrada en la figura 10-11 puede ser el flujo de materiales hacia adelante y el flujo de información hacia atrás. Así, la operación 2 depende de la operación 1 en el **material,** mientras que la operación 1 depende de la operación 2 en la **información.** En

FIGURA 10-10
Separación de operaciones



[2]Adaptado de Thompson (1967), reproducido con permiso de The McGraw-Hill Companies, Inc.

Interdependencia recíproca



este sistema, un paro en la operación 3 afectará la operación 2 por el flujo de información. De la misma manera, la operación 2 no comenzará a menos que obtenga la señal de información de la operación 3 de que se ha retirado un producto de la última estación. Esta información fluye hacia atrás y será la señal de salida de la materia prima para la operación 1.

La interdependencia recíproca es el principio básico del sistema jalar. El material fluye hacia adelante y la información hacia atrás. Una señal de una operación a una que le precede pide la cantidad requerida de un artículo. Un sistema jalar transforma un sistema interdependiente secuencial en un sistema interdependiente recíproco. Este principio es similar al que usan los supermercados en Estados Unidos; los productos se jalan hacia las repisas según la tasa de demanda. De hecho, Ohno cita este sistema de supermercados como la inspiración del sistema jalar instalado en Toyota. La aplicación del principio de jalar se conoce como el sistema JIT que se analizará en seguida.

4.3 Sistemas JIT

Los sistemas JIT combinan la componente de control de producción y una filosofía administrativa. Se requieren cuatro preceptos básicos para el éxito de un sistema JIT (Golhar y Stam, 1991):

Eliminación de desperdicio
Participación de los empleados en la toma de decisiones
Participación de los proveedores
Control total de la calidad

El **desperdicio** tiene una relación estrecha con los procesos que agregan costo (capítulo 2). De todos los tipos de desperdicio, el inventario es el que más atención ha atraído. Se asegura que el exceso de inventario cubre otros tipos de desperdicio. Al reducir el inventario, un objetivo del JIT, se descubren estos problemas. Para ampliar este concepto, con frecuencia se usa una analogía con un río y sus piedras (figura 10-12). Las piedras son los problemas y el río representa el material que fluye por la planta. El nivel del río se iguala al trabajo en proceso. Cuando el nivel del río es alto, los problemas están cubiertos. Al bajar el nivel del río quedan expuestos los problemas; éste es el primer paso para resolverlos.

La **participación de los empleados** como parte de la filosofía JIT va de la mano con la cultura de los sistemas controlados por el mercado. En un sistema JIT esto se logra a través del trabajo en equipo y de delegar autoridad en los empleados. Se da más responsabilidad a cada empleado en el proceso de producción. Un ejemplo típico es la responsabilidad de la calidad. En su expresión máxima cada empleado puede parar toda la línea de producción, si la calidad no es satisfactoria. Esto se conoce como *jidoka* en la terminología japonesa.

La **participación de los proveedores** indica una relación de trabajo distinta con los proveedores. En lugar de verlos como adversarios, los proveedores se consideran socios. La ten-

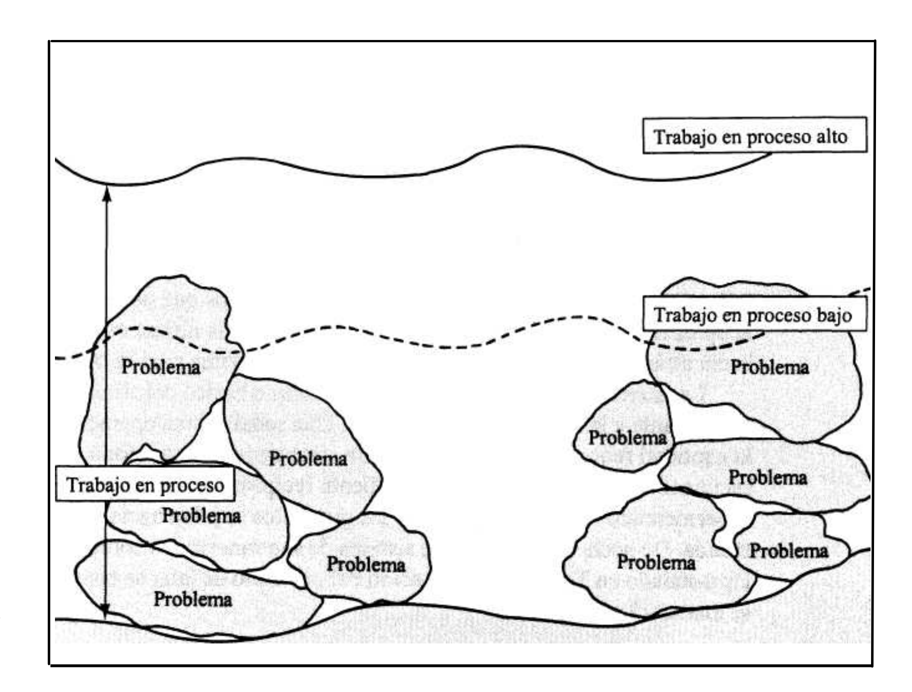


FIGURA10-12
Analogía con un río y las piedras

dencia es reducir el número de proveedores y establecer asociaciones a largo plazo con ellos. Este proceso es también parte del enfoque TQM, que se presentó en el capítulo 2. Su impacto es mayor cuando se implanta como parte de la filosofía JIT.

4.4 Sistemas kanban

En japonés, *kanban* significa *tarjeta* o *registro visible.* En un sentido más amplio, es una señal de comunicación de un cliente (como un proceso posterior) a un productor (como un proceso anterior). Como tal, es un sistema de información manual para controlar la producción, el transporte de materiales y el inventario. Existen tres tipos de *kanban,* pero dos de ellos son más comunes, *kanbans* de producción *{P-kanbans) y kanbans* de transporte *(T-kanbans).* Como su nombre lo implica, un *J>-kanban* da la autorización a un proceso para producir un número fijo de productos. Un *T-kanban* autoriza el transporte de un número fijo de productos hacia adelante. Las cantidades de material especificadas por el *¥-kanban y* el *T-kanban* no necesariamente son iguales. En la figura 10-13 se muestran ejemplos típicos de *P-kanbans y T-kanbans.*

Cuando se usan los dos *kanbans,* se tiene una sistema de tarjetas duales. Algunas veces las funciones de orden de producción y de transporte se combinan en una sola tarjeta.

4.4.1 Sistema de tarjeta dual

En la figura 10-14 se presenta un sistema de tarjeta dual. Un centro de trabajo anterior (z-1) abastece al centro posterior *i.* Cada centro de trabajo tiene cinco componentes:

Célula de producción, donde el proceso de conversión tiene lugar
Entrada a almacén (A)

Almacén estante núm. *SE215*
Artículo núm. *A2-15*
Artículo núm. *35670507*
Nombre *PIÑÓN*
Automóvil Tipo *SX50BC*

Capacidad de la caja	Tipo de caja	Orden núm.
20	B	4/8

Proceso anterior
FORJA *B-2*
Proceso subsecuente
MAQUINADO *M-6*

Almacén estante núm. *F26-18*
Artículo núm. *A5-34*
Artículo núm. *56790-321*
Nombre *ÁRBOL DE LEVAS*
Autómóvil tipo *SX50BC-150*
Proceso
MAQUINADO *SB-8*

FIGURA 10-13
Dos tipos de *kanban: d)T-kanban,* b) *V-kanban* (Monden (1993) con permiso del Institute of Industrial Engineers, 25 Technology Park/Atlanta, Norcross, GA, 30092, copyright© 1993)

Salida de almacén (B)
Puesto P-*kanban* (C)
Puesto T-*kanban* (D)

El sistema tiene dos ciclos de control, un ciclo P para controlar la operación de la célula y un ciclo T para controlar la transferencia de material entre los centros de trabajo. Las partes se almacenan en contenedores. Cada contenedor lleva una cantidad fija de producto, cuya producción autoriza una *P-kanban* y cuyo movimiento autoriza una *T-kanban.* Cada contenedor en la entrada de almacén (A) tiene una *T-kanban.* De manera similar, cada contenedor en la salida del almacén (B) tiene una *V-kanban.* Para entender cómo opera el sistema, se analiza cada ciclo por separado.

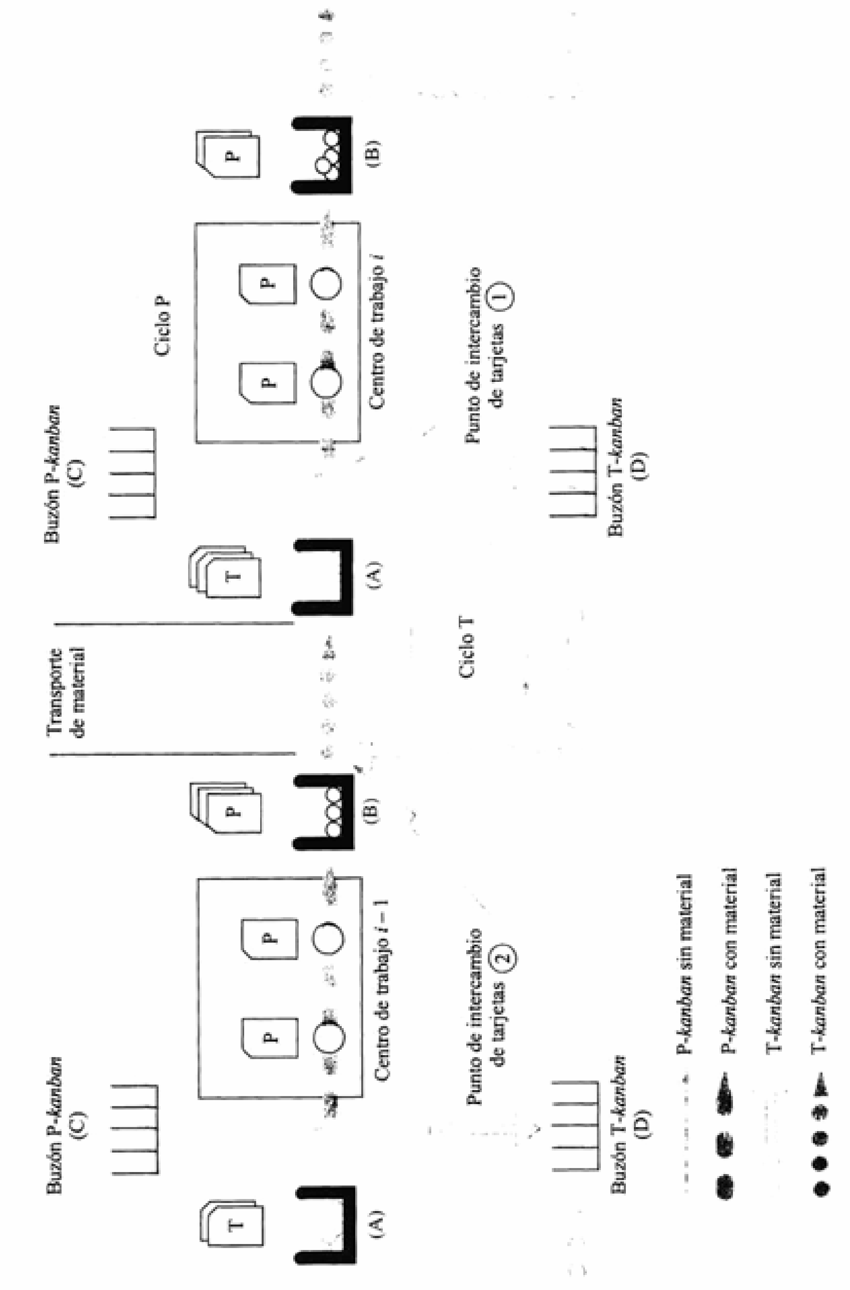


FIGURA 10-14
Un sistema *kanban* de tarjetas duales

Ciclo P. Cuando un número predeterminado (lote) de *Y-kanban* se acumula en el buzón *Y-kanban* (C) del centro de trabajo *i*, indica que el centro de trabajo / debe producir un lote. Las *Y-kanbans* se retiran del buzón y se llevan al punto de intercambio de tarjetas (1) a la entrada del almacén (A). Ahí, se retira la *T-kanban* de cada contenedor y se sustituye por una *Y-kan-ban.* Las *T-kanbans* se colocan en el buzón de *T-kanban* (D). El número de contenedores en este intercambio es igual al número de *Y-kanbans* en el buzón. La producción comienza y cada contenedor tiene una *Y-kanban.* Al acabar, el lote terminado se coloca en la salida de almacén (B) con las tarjetas P todavía ahí. Cuando se retira el contenedor de la salida (B), se quita su *Y-kanban y* se coloca de nuevo en el buzón *Y-kanban* (C). El buzón *Y-kanban* hace que las tarjetas estén visibles y muestra la cola de trabajo que debe realizarse en la célula.

Ciclo T. Cuando se acumula un número predeterminado de *T-kanbans,* se retiran del buzón *T-kanban* (D) del centro de trabajo i y se llevan al punto de intercambio de tarjetas (2) del centro de trabajo (i-l). Se retiran las *Y-kanbans* de cada caja y se sustituyen por las *T-kanbans.* Las *Y-kanbans* se colocan en el buzón de *Y-kanban* del centro de trabajo (i-l) y los contenedores con *T-kanban* se transportan a la entrada de almacén (A) del centro de trabajo /. La cantidad lanzada para que el *T-kanban* mueva, en ocasiones se sustituye por un control en el que el movimiento *T-kanban* se realiza en intervalos fijos.

El análisis del ciclo P y del ciclo T demuestra la manera en que funciona la interdependencia recíproca de un sistema jalar

Existen tres aspectos importantes en los sistemas *kanban:* no existe un contenedor de materiales sin una tarjeta *kanban,* sólo una *Y-kanban* autoriza la producción y sólo un *T-kanban* autoriza el transporte. Estas guías hacen que todos los centros de trabajo estén casi sincronizados. Suponga que ocurre una falla en la estación *i.* Todos los centros de trabajo posteriores se quedarán sin material para trabajar. Todas las estaciones anteriores se quedarán sin *Y-kanbans* que autoricen la producción, porque no regresarán las *T-kanbans* para dar salida a las *Y-kanbans.* Esto da como resultado una línea de producción prácticamente sincronizada. La velocidad a la que viajan las interrupciones a lo largo de la línea depende del número de *kanbans.* Como no hay material sin un *kanban,* el número de *kanbans* controla el nivel del inventario en el sistema.

Los sistemas *kanban* funcionan mejor cuando se minimiza el *nivel de demanda* y desperdicio. En particular, cuando los tiempos de preparación son pequeños (se estudiará más adelante), el equipo es confiable y los productos defectuosos nunca se transportan al centro de trabajo siguiente.

Para evitar el transporte de productos defectuosos, Toyota desarrolló métodos y dispositivos para el control automático de defectos. En japonés, esto recibe el nombre *dejidoka y* el término en inglés es ***autonomation*** o **autocontrol** (que no debe confundirse con automatización). *Aunquejidoka* tiene que ver con algún tipo de automatización, también se puede usar junto con operaciones manuales. En cualquier caso, es meramente una técnica para detectar defectos y un mecanismo para detener la producción cuando ocurren anormalidades.

4.4.2 Sistemas de una sola tarjeta

En algunos casos, es suficiente usar una sola tarjeta. El sistema es más sencillo a costa de perder algo del control. El transporte de materiales todavía se controla con las *T-kanbans,* pero no

hay *V-kanbans.* En su lugar, las partes se producen de acuerdo con un programa diario y se mueven hacia adelante con las *T-kanbans.*

En cierto sentido, un sistema de una tarjeta es una combinación del control de empujar para la producción (es decir, producir conforme a un programa) y un control de jalar para las entregas. Tal vez el inventario sea más alto en este sistema ya que la producción está controlada por el programa. Los sistemas de una sola tarjeta operan bien cuando el tiempo de producción es corto y es posible crear un programa de producción detallado. El concepto que apoya el sistema de una tarjeta es similar a la política clásica de control de inventarios de dos contenedores.

Un derivado importante del sistema de una tarjeta es el cuadro *kanban,* que se introdujo en el capítulo 2 (figura 2-8). Éste actúa como un *T-kanban;* cuando está vacío, manda una señal a la operación anterior para comenzar la producción y proporcionar otra unidad que llene el cuadro. Este tipo de sistema en ocasiones recibe el nombre de *sistema traslapado,* en contraste con un sistema de tarjetas que a veces se llama *sistema enlazado.* El sistema traslapado se usa cuando las estaciones de trabajo están cerca unas de otras. La inspección visual lanza una decisión de reabastecimiento. Schoenberger (1983) proporciona más información sobre sistemas de más de una tarjeta.

4.4.3 Características del sistema *kanban*

Un sistema *kanban* no es para todo mundo. Funciona mejor cuando el flujo es uniforme y la mezcla de productos es muy estable. Una suposición implícita en un sistema *kanban* es que las operaciones de preparación son cortas en todas las estaciones de trabajo. Esto se requiere para que cada centro de trabajo pueda cambiar la producción de partes con tanta frecuencia como sea necesario para cumplir con la demanda especificada por las *V-kanbans.*

Cuando se tiene un flujo uniforme, el sistema *kanban* opera como una brigada en cadena para pasar cubetas. Cada miembro de la cadena pasa más o menos el mismo tiempo pasando la cubeta y no se necesitan cubetas en inventario. Si la salida es más lenta, toda la cadena lo hace más despacio, y si se acelera, la cadena lo hace más rápido. La velocidad máxima es restringida por el más lento en pasar la cubeta y, para la mayor parte de los sistemas JIT, está diseñada de manera que sea menor que la demanda máxima. La variabilidad desorganiza un sistema *kanban.* Entonces deben introducirse tarjetas adicionales (o contenedores) para evitar faltantes.

Por último, el *kanban* no funciona bien en sistemas con muchos números de inventario activos. El gran número de *kanbans* que se necesitan aumentará los inventarios, y el control será complicado ya que se usa un sistema de información manual.

El control de empujar se puede implantar en formas distintas al *kanban.* Por ejemplo, los contenedores mismos pueden sustituir la *V-kanban.* Las *T-kanban* se pueden manejar mediante comunicación electrónica o por medio de una señal que indique la necesidad de más material.

4.5 Modelos JIT

Existe un gran acervo literario que describe los diferentes aspectos del sistema JIT. Algunos estudios son empíricos, otros usan simulación y otros utilizan modelos cuantitativos. Se presentarán modelos para cuatro aspectos de JIT; tres se relacionan con el sistema *kanban* y uno con el sistema JIT en sí. Los modelos son sistemas jalar con un modelo mixto secuencial, número requerido de *kanbans,* flujo de material en un sistema *kanban* basado en el tiempo y el modelo analizado en la sección 4.7 sobre la economía del reducción de preparaciones.

4.5.1 Sistema de producción jalar de un modelo mixto secuencial

Los fabricantes modernos con frecuencia producen artículos muy similares, pero no idénticos, en la misma línea. Un ejemplo es un fabricante de automóviles que produce transmisiones automáticas de tres y cuatro velocidades y transmisiones manuales de cuatro y cinco velocidades en la misma línea de producción. Como la línea está diseñada con cero tiempos de preparación, una transmisión manual de cinco velocidades puede ir seguida de una automática de tres, en lugar de producir todas las del mismo tipo juntas. Ésta es una parte integral del "sistema de producción Toyota".

Las dos metas principales del sistema son **balancear la línea y usar una tasa constante** de partes para los distintos productos. El balanceo de la línea es un problema de diseño. Suponiendo que la línea está balanceada con un tiempo de ciclo *CT*, la línea terminará un trabajo cada CTunidades de tiempo. El tiempo de producción para cada trabajo será m(Cr),donde mes el número de estaciones de trabajo en la línea. La secuencia de productos fabricada afecta en forma importante la tasa de uso de las partes.

Monden (1993) describe el "algoritmo de persecución de metas" que usa Toyota para intentar determinar la secuencia de productos múltiples que mantiene la tasa de uso más cercana a la constante para todas las componentes. Defina una unidad de tiempo como *mCT;* en realidad, se lleva /wC^producir una unidad, pero como se traslapan, sale una unidad terminada cada *CT* unidades. Se ignorará el tiempo de traslape en este análisis. Sea

n = número de productos diferentes a fabricar D_i = número entero de unidades demandadas del producto i, i = 1, 2,. .., n durante el horizonte de programación $T = D_l$ +Z)$_2$ + •••+/)„= número total de unidades a fabricar de todos los productos

T es también el tiempo, en "unidades", para producir todos los artículos. Si la meta es programar una tasa de producción constante de cada producto, la tasa de producción ideal para el producto i en el tiempo t está dada por

$$tD_i \Big/ \sum_{k=1}^{t} D_k$$

Se quiere que la tasa de producción real para cada producto sea muy cercana a la tasa ideal en cada etapa. Sea x_{it} el número acumulado de unidades del producto /producidas hasta e incluyendo el tiempo t. Esto lleva a la siguiente función objetivo:

$$\text{Minimizar} \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{n} \left(x_{it} - \left(tD_i \Big/ \sum_{k=1}^{t} D_k \right) \right)^2$$

Es difícil resolver el problema de programación para esta función objetivo. Se pueden encontrar detalles completos en Monden (1993) o en Miltenburg (1989).

De manera alternativa, la meta de programar una tasa constante de producción para cada producto se puede lograr manteniendo un intervalo constante, entre la terminación de cada unidad de producto i. Esto sugiere que cada trabajo tiene un tiempo de terminación ideal, por lo que se asigna una fecha de entrega a cada uno que refleje este tiempo ideal. Se propone minimizar la desviación (absoluta o cuadrada) entre las fechas de entrega y los tiempos reales de terminación. Esto penalizará a un trabajo que termina antes o después.

Deben hacerse D_i unidades del producto / en el horizonte de tiempo $T = \sum_{i=1}^{n} D_i$, entonces una tasa de producción contante sería completar una unidad del producto i cada T/D_i ciclos. Si $T = 10$ y $D_1 = 1$, se desea terminar una unidad cada 10 ciclos. Suponiendo que el programa se repite, esto se logra terminando una unidad en el tiempo 5; en el siguiente ciclo se completará en el tiempo 15,10 ciclos después. Si $D_1 = 2$, se quiere terminar una unidad cada cinco ciclos, entonces, debe haber cinco ciclos entre las fechas de entrega de la primera y segunda unidades del producto 1. Si el programa se repite, debe haber cinco ciclos entre la última unidad del primer programa y la primera del segundo. Al establecer la fecha de entrega de la primera unidad en 2.5 y de la segunda en 7.5 habrá exactamente cinco ciclos entre cada unidad sin importar cuántas veces se repita la secuencia. Para el producto z, sea

j el índice de cada unidad de producto i ($j = 1, 2, \ldots, D_i$)
d_{ij} su terminación ideal, o fecha de entrega

La fecha de entrega para el primer trabajo (unidad) del producto *i* es

$$d_{i1} = T/(2D_i)$$

y el tiempo de terminación ideal para el segundo trabajo (unidad) del producto *i* es

$$d_{i2} = d_{i1} + T/D_i$$
$$= 3T/(2D_i)$$

En general, la fecha de entrega para el trabajo *j* del producto *i* es

$$d_{ij} = (j - 1/2)T/D_i$$

Estos tiempos de terminación ideales simplemente extienden la producción lo más posible, suponiendo que hubo (y habrá), en esencia, producción de los mismos productos antes (y después) del tiempo *T*.

El objetivo es minimizar la desviación total (absoluta o cuadrada) entre las fechas de entrega y los tiempos reales de terminación. Sea t_{ij} el tiempo de terminación del trabajo *j* del producto tipo *i*. Usando la función objetivo del cuadrado de las desviaciones, el problema es obtener una secuencia de las unidades de tiempo de procesado de los trabajos con las fechas de entrega dadas para

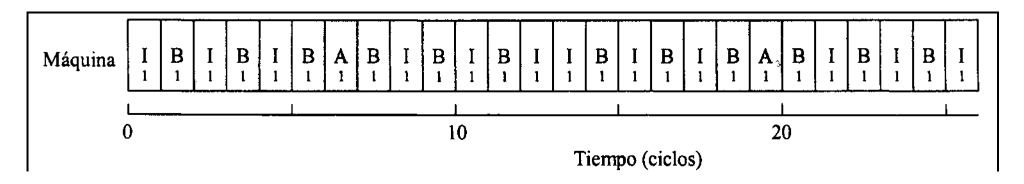
$$\text{Minimizar} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{D_i} (t_{ij} - d_{ij})^2$$

Este problema se resuelve con facilidad poniendo primero en la secuencia el trabajos con la fecha de entrega más cercana (FEC). La secuencia FEC minimiza la desviación de las fechas de entrega, pero no hay garantía de que produzca una secuencia óptima para la medida de producción acumulada. Dada la manera en que se generan las fechas de entrega, con frecuencia hay empates en la secuencia FEC; para cumplir con la función objetivo de producción acumulada, los empates se rompen dando preferencia al trabajo cuyo producto tiene la mayor demanda.

Inman y Bulfin (1991) demostraron que, en promedio, el enfoque FEC toma poco tiempo para problemas grandes y proporciona mejores secuencias para el objetivo acumulado que el algoritmo heurístico de Miltenburg (1989).

Ejemplo 10-1. Programación de un modelo mixto. Una línea de producción de modelo mixto fabrica tres tipos distintos de radios de onda corta. La demanda para la próxima semana es 600 radios básicos, 600 intermedios y 100 avanzados. ¿Cuál debe ser la secuencia para suavizar el uso de partes? [Los números de partes para este ejemplo se tomaron de Miltenburg (1989).]

FIGURA 10-15
Programa de producción para el modelo mixto FEC



Solución. Primero, este problema se puede reducir a repetir cien veces secuencias con 6,6 y 1 unidad de cada tipo de radio, de manera que se tiene n = 3, D_l = 6, D_2 = 6, D_3 = 1 y T = 13. La tabla 10-2 proporciona las fechas de entrega para cada unidad de cada radio.

El resultado al ordenar estos trabajos, según la FEC, es la secuencia I-B-I-B-I-B-A-B-I-B-I-B-I, que es la secuencia óptima para ambos objetivos. Este programa se repetirá 100 veces. La figura 10-15 es una gráfica de Gantt para las primeras dos operaciones.

TABLA 10-2
Cálculo de fechas de entrega para los radios

Producto (*i*)	**Unidad (*j*)**	d_{ij}	c_{ij}
Básico (B)	1	13/12= 1.08	1
	2	39/12= 3.25	3
	3	65/12= 5.42	5
	4	91/12= 7.58	8
	5	117/12= 9.75	10
	6	143/12=11.92	12
Intermedio (I)	1	13/12= 1.08	2
	2	39/12= 3.25	4
	3	65/12= 5.42	6
	4	91/12= 7.58	9
	5	117/12= 9.75	11
	6	143/12=11.92	13
Avanzado (A)	1	13/2= 6.50	

j = tiempo de terminación.

4.5.2 Número de *kanbans* requeridos

Existen varios métodos para determinar cuántos *kanbans* se requieren. Se presenta el método original usado por Toyota para establecer el número de *kanbans* (Monden, 1993). Este modelo todavía es de uso común. Se establece

n = número de conjuntos P- y *T-kanban* para una parte dada D = demanda por unidad de tiempo, casi siempre un día (D se toma como la demanda balanceada)

L — tiempo de entrega promedio para el *kanban*, en fracciones decimales de día t = tiempo de procesado promedio por contenedor, en fracciones decimales de día t_w = espera promedio durante el proceso de producción más tiempo de transporte por contenedor, en fracciones decimales de día C = capacidad del contenedor, en unidades de productos (no más de 10% de la demanda diaria) a = coeficiente de seguridad (no más del 10%)

Entonces

$$L = t_p + t_w$$

y

$$n = \frac{DL(1+\alpha)}{C}$$

El numerador representa la demanda promedio durante el tiempo de entrega más un inventario de seguridad.

El tiempo de entrega promedio para las Y-kanban depende del tiempo real de manufactura y del tiempo que pasa en la cola en el buzón V-kanban. Para los kanbans de transporte, L es el tiempo transcurrido entre la colocación de una tarjeta en el buzón T-kanbans y su regreso al almacén de entrada. Entonces, L se determina por la frecuencia de intercambios y el tiempo de transporte.

La práctica de Toyota es dejar el valor de n relativamente fijo, a pesar de las variaciones en D. Así, cuando D aumenta, el tiempo de entrega L debe disminuir. Si esto no se puede lograr a través de mejoras en los procesos, se tendrá tiempo extra. El tiempo extra es desperdicio, algo que debe eliminarse. Una alternativa es aumentar el número de kanbans, pero aumentará el trabajo en proceso, otro tipo de desperdicio. Por lo tanto, la administración ve a a como un indicador de la capacidad de mejora de la planta. Una a pequeña implica una mejor operación de la planta. La reducción de trabajo en proceso se puede lograr reduciendo ao L.

En el siguiente ejemplo, se muestra cómo determinar el número de kanbans.

Ejemplo 10-2. Cálculo del número de kanbans. La Chipcard Company es un pequeño fabricante de tarjetas de circuitos impresos para la industria electrónica. Una fase del proceso de manufactura se realiza en secuencia en una célula con tres máquinas. Las tres máquinas llevan a cabo la inserción de una componente radial, la inserción de una componente axial y la inserción de una componente de forma irregular. Cuando el circuito impreso sale, va una máquina de soldadura.

La demanda diaria de circuitos impresos es 900 unidades. Éstas se mueven entre las máquinas en contenedores pequeños; cada uno con 15 circuitos. Un contenedor pasa 0.05 días en procesado y 0.12 días en espera y transporte durante el ciclo de manufactura. La política de la administración es tener un inventario de seguridad igual al 8% de la demanda del tiempo de entrega, es decir, a = .08.

Dados los datos anteriores, el número de conjuntos kanban requeridos es

$$n = \frac{900 \times (0.05 + 0.12) \times 1.08}{15} \approx 11$$

Si se usan 11 conjuntos *kanban*, el número de P-*kanbans* es

$$\frac{900 \times 0.12 \times 1.08}{15} \approx 8$$

mientras que el número de T-*kanbans* es

$$\frac{900 \times 0.05 \times 1.08}{15} \approx 3$$

El trabajo en proceso máximo es 165 circuitos (11 contenedores por 15 circuitos por contenedor). Después de mejorar el proceso, el tiempo de entrega total disminuyó 20%, a 0.136 días por contenedor. Como resultado, el número de kanbans requerido se redujo a

$$\frac{900 \times 0.136 \times 1.08}{15} \approx 9$$

con una disminución correspondiente de inventario en proceso a 135.

4.5.3 Flujo de materiales basado en el tiempo

Buzacott y Shanthikumar (1993) presentan un modelo de flujo de materiales basado en el tiempo de un sistema *kanban.* En realidad se trata de un modelo genérico para el flujo de materiales a través de células en serie, como se describe en la figura 10-14. El modelo proporciona un análisis basado en el tiempo de eventos tales como tiempo de llegada de la materia prima y tiempo en el que se genera un P-*kanban.* Uno de los descubrimientos del modelo se relaciona con el trabajo en proceso. Si se coloca más inventario inicial en las últimas etapas del sistema, se obtiene mejor servicio a las demandas del cliente. Si el valor agregado del producto en etapas intermedias es despreciable, entonces es óptimo tener todo el inventario en la etapa final.

Un enfoque común al modelado de JIT se refiere a redes de colas de ciclo cerrado (una buena revisión de estos modelos se puede ver en Graves *et al.,* 1993). Para la mayoría de las aplicaciones prácticas, la solución de los modelos de colas puede ser inmanejable por lo que se usa simulación. Se pueden usar paquetes generales de simulación (como GPSS, SIMAN y SLAM) o paquetes más orientados a la planta (como CINEMA, XCELL Y WITNESS). Muchos de los paquetes de simulación incluyen el manejo de gráficas a color, lo cual complementa el análisis. Además, es una ayuda importante al presentar los resultados a la administración.

4.6 Modelos CONWIP

CONWIP viene de *trabajo en proceso constante (constant work inprocess).* Éste es un enfoque de sistemas jalar introducido por Spearman *et al* (1990). Los sistemas *kanban* funcionan

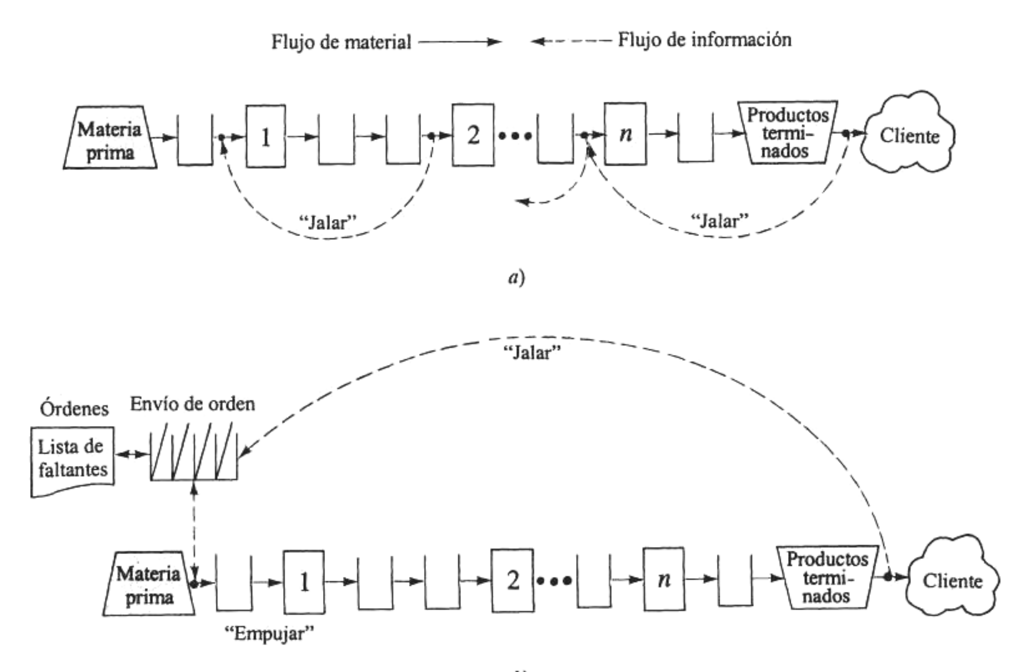


FIGURA 10-16
Comparación de sistemas *a) kanban* y *b)* CONWIP

mejor con un flujo uniforme, una característica muy estable para el desarrollo de un sistema que posee los beneficios de un sistema jalar, pero se pueden usar en una gran variedad de entornos de manufactura.

Para describir CONWIP, se supone una sola línea de producción, donde las partes se mueven en contenedores y cada uno de ellos contiene prácticamente la misma cantidad de "contenido de trabajo". Esto asegura que el tiempo de procesado en cada estación de trabajo, incluyendo un cuello de botella, será más o menos el mismo. En la figura 10-16 se muestran un sistema CONWIP y un sistema *kanban* estándar. Igual que el *kanban,* CONWIP se basa en una señal de información —por tarjetas, electrónica o con los mismos contenedores—. La tarjeta se fija al contenedor al principio de la línea y viaja con él hasta el final. En ese punto, se quita la tarjeta del contenedor y se regresa a una línea de espera o cola de tarjetas al principio de la línea. Eventualmente, la tarjeta dejará la cola (también llamada *lista de/altantes)* y se fijará a otro contenedor de partes, con el fin de viajar por la línea de producción otra vez.

En un sistema *kanban,* un *T-kanban* pasa por un ciclo a la siguiente estación de trabajo de ida y de regreso. En un sistema CONWIP, la tarjeta viaja por un circuito que incluye toda la línea de producción. Más aún, en un sistema *kanban* cada *V-kanban* indica la producción de un artículo específico. En la línea CONWIP, las tarjetas de producción se asignan a la línea en lugar de a un producto. Se asignan números de partes a las tarjetas al principio de la línea. Los sistemas CONWIP son similares a los sistemas de una sola tarjeta, ya que usan un programa y una *T-kanban.*

Los números de partes se toman de la lista de faltantes. Esta lista se genera a partir de un programa maestro de producción o de las órdenes que se agregan a la lista cuando llegan. La lista de faltantes dicta qué va a la linea y la tarjeta decide cuándo. Un contenedor entrará a la línea sólo cuando una tarjeta esté disponible. Indicará a producción el primer número de parte en la lista de faltantes para el que se dispone de materia prima. Observe que si no hay una tarjeta disponible, ningún contenedor entra a la línea, aun cuando la primera estación de trabajo esté ociosa.

CONWIP es un híbrido de los sistemas empujar y jalar. Un sistema empujar inicia la producción anticipando el futuro; en CONWIP la lista de faltantes, basada en el MPS, realiza esta función. Los sistemas jalar responden a la demanda real, de manera parecida al sistema de tarjetas de CONWIP. Otra diferencia entre CONWIP y empujar es el sistema de retroalimentación interno (que contienen todos los sistemas jalar).

Spearman y Zanzanis (1992) proporcionan las siguientes diferencias entre *"kanban* puro" y los sistemas CONWIP:

CONWIP utiliza una lista de faltantes para indicar la secuencia de números de partes.
En CONWIP, las tarjetas se asocian con todas las partes producidas en una línea en lugar de con los números de partes individuales.

- En CONWIP, los trabajos se empujan entre los centros de trabajo en serie, una vez que se autorizan mediante una tarjeta de inicio al principio de la línea.

Se asegura que CONWIP, debido a su enfoque de tarjetas por línea, maneja mejor las líneas de producción que fabrican muchas partes. La lista de faltantes administra una demanda fluctuante y preparaciones más largas, ya que hay un control explícito de qué partes se fabrican y en qué secuencia. Algunos análisis teóricos muestran que CONWIP dará como resultado niveles menores de trabajo en proceso que eii el sistema *kanban,* para la misma cantidad producción (Spearman y Zanzanis, 1992). Por último, se estima que el caso más favorable para aplicar

CONWIP es aquel en que una compañía intenta operar sus líneas de producción cerca de su capacidad.

Para resaltar el análisis del modelo CONWIP se presentan dos modelos, el de control CONWIP y el de evaluación del desempeño CONWIP.

4.6.1 Control de la producción basada en CONWIP

Igual que en otros métodos de control de la producción, existen parámetros operativos importantes que se deben determinar con el fin de implantar este método de control. Sea

n = número de tarjetas o contenedores. En una línea controlada por CONWIP, el trabajo en proceso está acotado y, por lo general, la línea opera con el nivel máximo posible de trabajo en proceso. Éste es un aspecto importante, ya que el tiempo de flujo robusto que caracteriza a un sistema CONWIP se relaciona con el trabajo en proceso. Usando la ley de Little,

$$\text{Tiempo de flujo} = \frac{\text{trabajo en proceso}}{\text{tasa de entrada}}$$

La tasa de entrada, por supuesto, es igual a la tasa de salida. Para una tasa de entrada dada y un nivel fijo de trabajo en proceso, la aproximación del tiempo de flujo es muy robusta.

Igual que en cualquier otro sistema de control de la producción, el cambio de estos parámetros involucra trueques. Al aumentar el número de tarjetas se incrementarán el tiempo de flujo (los inventarios) y el nivel de servicio al mismo tiempo. A continuación se muestra cómo se puede determinar el número de tarjetas con una modificación del método descrito por Hopp y Spearman (1991).

Se considera la misma configuración de la línea CONWIP descrita en la figura 10-16. También se supone:

Demanda infinita, que implica un nivel máximo de trabajo en proceso y que la línea está operando todo el tiempo.
Tiempos de procesado fijo. Ésta es una suposición razonable, puesto que en un entorno de producción altamente automatizado, la variablidad del proceso es muy pequeña. • Se está produciendo un solo artículo.

La pregunta es, ¿cuánto trabajo en proceso se necesita en realidad?

Defina

m = número de máquinas
n = número de tarjetas (contenedores)
t_i = tiempo de procesado en la máquina i, $i = 1, 2, \ldots, m$
t_{CB} = tiempo de procesado en la máquina cuello de botella, $t_{CB} = \text{máx}_{i=1,m}\ t_i$

Se quiere que la máquina cuello de botella trabaje todo el tiempo. Como el sistema es determinístico, las colas sólo pueden ocurrir antes de la máquina cuello de botella. Si algún contenedor deja la máquina cuello de botella, el tiempo que transcurre hasta que regresa al cuello de botella es la suma de los tiempos de procesado en todo el resto de las máquinas. Esto es,

$$\sum_{i=1}^{m} t_i - t_{CB}$$

m

Durante este tiempo, el cuello de botella debe procesar los otros $(n - 1)$ contenedores, suponiendo que hay n contenedores en el sistema (el número de tarjetas). Este tiempo es igual a

$$(n - 1)t_{CB}$$

Si el cuello de botella procesa el contenedor bajo consideración y trabaja todo el tiempo, e tiempo que pasa para que un contenedor llegue al cuello de botella debe ser menor o igual que el tiempo que toma al cuello de botella procesar los otros n -1 contenedores. En otras palabras,

$$(n - 1)t_{CB} \geq \sum_{i=1}^{m} t_i - t_{CB}$$

o

$$n = \sum_{i=1}^{m} t_i / t_{CB}$$

En la práctica, el número de contenedores es un entero. Con la finalidad de que el cuello d<: botella trabaje todo el tiempo, el número de contenedores n debe redondearse al entero más cer cano mayor que n. En este caso, se puede formar una cola frente a la máquina cuello de botella.

4.6.2 Evaluación del desempeño de control CONWIP

Un aspecto importante de la implantación del sistema CONWIP es la evaluación del desempeño. El enfoque de los sistemas jalar es "establezca el trabajo en proceso y mida la producción*, y el sistema CONWIP no es una excepción. Para planear, deben determinarse las medidas d *i* desempeño operacionales. Una medida común es la producción media, porque permite calen - lar los tiempos de terminación y establecer fechas de entrega realistas. CONWIP es un sistemi de producción cerrado: cuando un contenedor llega al final de la línea se retiran los productos terminados y el contenedor se manda ai principio de la misma. Por la ley de Little, cuando se elige un nivel de trabajo en proceso existe un trueque entre el tiempo de flujo y la produccióí. Si se establece un nivel alto de trabajo en proceso, entonces la producción para un tiempo de flujo dado es más alta. El resultado de un nivel bajo de trabajo en proceso es una producción menor para un tiempo de flujo dado. Como se observa, CONWIP es un sistema de producción cerrado y se puede describir en términos de una red cerrada de colas. Existen muchos me - délos analíticos robustos y aproximaciones para evaluar el desempeño de las redes de colas C(- iradas. Se estudiará un algoritmo sencillo, llamado análisis del valor medio (AVM), cu>a introducción se debe a Reiser y Lavenberg (1980). Sea

i = índice de las estaciones de trabajo (i = 1, 2,..., m) l = número de contenedores (l= 1, 2,. .., n) $W(l)$ = producción relativa del sistema como una función del número de contenedores l

$(0 < W(l) < 1)$

$N_i(l)$= número de contenedores en la estación de trabajo i como una función del número de contenedores l.

$F_i(l)$ = tiempo de flujo en la estación i como una función del número de contenedores l μ_i = tasa de procesado promedio en la estación de trabajo i

$N_i(l)$ y $F_i(l)$ son, de hecho, variables aleatorias. Por lo tanto, los cálculos se realizan sobre v ilores esperados. Suponiendo una línea de un solo producto,

1. Se hace $E[N_i(0)] = 0,\ i = 1, 2, \ldots, m.$
2. Para $l = 1, 2, \ldots, n$ se calcula

$$E[F_i(l)] = \frac{E[N_i(l-1)] + 1}{\mu_i} \qquad i = 1, 2, \ldots, m$$

$$W(l) = l \Big/ \sum_{i=0}^{m} \{E[F_i(l)]\}$$

$$E[N_i(l)] = W(l)E[F_i(l)] \qquad i = 1, 2, \ldots, m$$

3. El proceso se detiene.

El AVM es teóricamente correcto sólo para tiempo de procesado con distribución exponencial.

Ejemplo 10-3. Ensamble del FAX Baer. Baer, Inc. tiene una línea de ensamble CONWIP para las máquinas de fax, con cinco estaciones, 1,2,3,4 y 5. El proceso es secuencial y las máquinas de fax llegan una a la vez en banda transportadora. Los tiempos en cada estación son exponenciales con medias

$$\mu_1 = 1.0 \text{ unidades por minuto y}$$
$$\mu_i = 1.3 \text{ unidades por minuto } (i = 2, 3, 4, 5)$$

Los tiempos de movimiento son despreciables. La estación 1 es el cuello de botella.

Primero se estima el número mínimo de contenedores necesarios para que el cuello de botella trabaje todo el tiempo. Se tiene t_x = 1/1 minutos por unidad y $í_{\text{j}}$ = 1/1.3 minutos por unidad para i = 2, 3,4, 5. Entonces

$$n = \sum_{i=1}^{5} t_i/t_1 = 4.07 \quad \rightarrow \quad 5 \text{ contenedores}$$

Usando una hoja de cálculo, se evalúa el desempeño con el algoritmo de AVM. Los resultados se muestran en la tabla 10-3.

Con cinco contenedores, el número esperado de contenedores en el cuello de botella (estación de trabajo 1) es más de 1. Sin embargo, la producción en esta etapa está abajo de la producción teórica. Conforme el número de contenedores aumenta, el tiempo de flujo y la producción esperados también aumentan. Así, con ocho contenedores, la línea de ensamble llega al 80% de su producción teórica.

La producción alcanzará el valor teórico de 1 sólo cuando los tamaños de las colas son no restringidos, es decir, cuando el número de contenedores alcance infinito. Existe un trueque muy claro

TABLA 10-3
Evaluación del desempeño de CONWIP

	$N_1(l)$	$N_2(l)$	$N_3(l)$	$N_4(l)$	$N_5(l)$	$F_1(l)$	$F_2(l)$	$F_3(l)$	$F_4(l)$	$F_5(l)$	$W(l)$
1 =1	0.25	0.19	0.19	0.19	0.19	1	0.77	0.77	0.77	0.77	0.25
/ =2	0.51	0.37	0.37	0.37	0.37	1.25	0.91	0.91	0..91	0.91	0.41
/ =3	0.79	0.55	0.55	0.55	0.55	1.51	1.06	1.06	1.06	1.06	0.52
/ =4	1.09	0.73	0.73	0.73	0.73	1.79	1.19	1.19	L.19	1.19	0.61
/ =5	1.41	0.90	0.90	0.90	0.90	2.09	1.33	1.33	1.33	1.33	0.68
/ =6	1.75	1.06	1.06	1.06	1.06	2.41	1.46	1.46	1.46	1.46	0.73
/ =7	2.12	1.22	1.22	1.22	1.22	2.75	1.59	1.59	1.59	1.59	0.77
/ =8	2.51	1.37	1.37	1.37	1.37	3.12	1.71	1.71	1.71	1.17	0.80

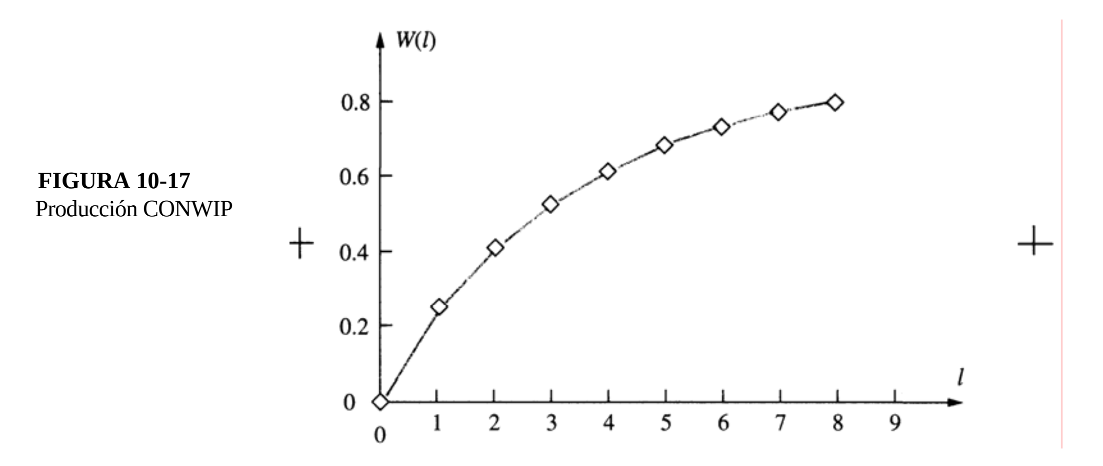


FIGURA 10-17
Producción CONWIP

entre la producción del sistema y el tiempo de flujo esperado. La figura 10-17 describe la re a-ción entre el número de contenedores y la producción obtenida. Observe (tabla 10-3) que las colas también se forman antes del cuello de botella.

4.7 Reducción de preparaciones

La reducción de preparaciones es un elemento que indica si una organización tiene una culti ra de producción controlada por el mercado. ¿A qué se debe esto? De nuevo se cita el objetivo o i ginal del sistema de producción Toyota: "un sistema de producción para fabricar el tipo de ui á dades necesarias, en el momento en que se necesitan y la cantidad que se necesita" (Monden. 1993). La reducción de preparaciones acorta el tiempo de entrega y, por lo tanto, apoya la coin ponente de "en el momento en que se necesitan" de este objetivo. Además permite la c- prodi ción económica de lotes pequeños, y, de esta manera, apoya la componente de "la cantidad q le se necesita". En pocas palabras, la reducción de preparaciones agrega flexibilidad al sistei la —se pueden fabricar muchos productos diferentes en forma económica ("el tipo de unidaqes necesarias") y de todas maneras mantener tiempos de entrega cortos—.

¿Por qué la reducción de preparaciones permite la producción económica de lotes peque ños? Para contestar esta pregunta, recapacite en la fórmula del EOQ estudiada en el capítulo 5 Se analizó el lote económico (EOQ) más que la cantidad óptima de producción (EPQ) por n-ce veniencia matemática; no obstante, el argumento se cumple para EPQ. Recuerde que la can ti dad óptima a ordenar *Q* está dada por

$$Q^* = \sqrt{(2AD)/(ic)}$$

donde *D* es la tasa de demanda anual, *ic* es el costo de mantener inventario por unidad de tiei n po y *A* es el costo de preparación. El costo de preparación es proporcional al tiempo requerid» para la operación de preparación.

Durante varias décadas, *A* se tomó como un parámetro fijo del sistema, como lo eran el costo de mantener / y el costo unitario *c*. Así, en esencia, *D* determinaba la cantidad óptim; i ordenar; una *D* más alta significaba una *Q* mayor y viceversa. Cuando las presiones del mere a-do cobraron importancia y la flexibilidad de la producción fue imperativa, se reexaminó la ecuación del EOQ y se hicieron esfuerzos por reducir *A*. Las razones de tales esfuerzos se muestran en la figura 10-18.

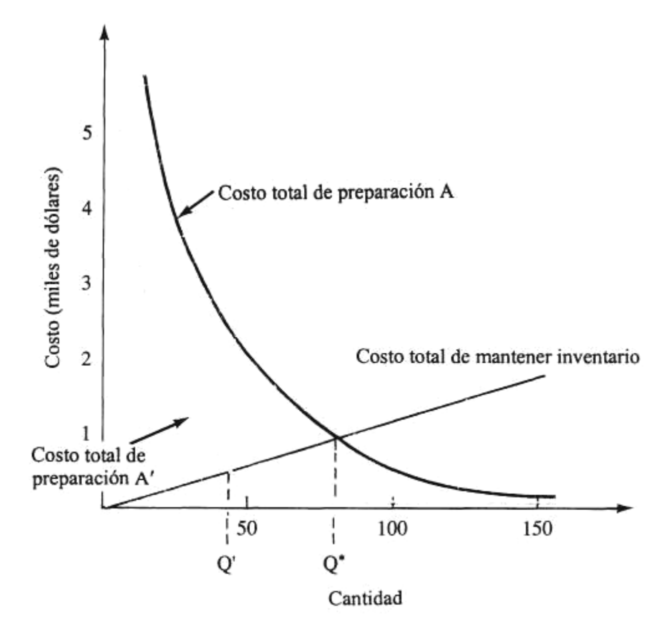


FIGURA 1 0-18
Efecto de reducir la preparación

Para *ic*y *D*fijos, reducir *A* al valor *A'(A'<A)* disminuye sustancialmente el costo total y la cantidad a ordenar correspondiente. Aunque éste es un concepto sencillo, se ignoró durante muchos años porque no había una motivación para analizarlo. Uno de los primeros ejemplos (en 1970) de reducción de preparaciones se registró en Toyota: el tiempo de preparación de una prensa de corte de 800 toneladas para la defensa se redujo de varias horas a ¡tres minutos!

La reducción de la preparación requiere creatividad ingenieril. También puede requerir inversión en equipo nuevo, un proceso de manufactura distinto, esfuerzo de ingeniería y más. A continuación se presentan algunos principios de diseño para lograr la reducción de la preparación, seguidos de la parte económica de esta reducción.

4.7.1 Principios de diseño

Conviene dar una definición más precisa de preparación. El tiempo de preparación (cambio) se puede definir como el tiempo que transcurre entre la última parte buena de la preparación anterior y la primera parte buena de la nueva preparación. Incluye preparar el equipo para el nuevo producto y corridas de prueba y ajustes hasta lograr la calidad deseada.

La reducción de preparaciones requiere un enfoque sistemático que sigue cierto número de principios. Shingo (1981) fue el primero en documentar estos principios que después se refinaron. Existen básicamente cinco paso (Suzaki, 1987).

1. Se separan la **preparación interna** (trabajo que debe hacerse con la máquina parada) y la **preparación externa** (trabajo que se puede hacer mientras la máquina opera).
2. En la medida de lo posible, se transforma la preparación interna en preparación externa.
3. Se reduce la preparación interna eliminando ajustes, simplificando uniones y separacio nes, añadiendo personal de ayuda, etcétera.
4. Se reduce el tiempo total para ambas preparaciones, interna y externa.

5. Si es posible, se elimina toda la preparación.

Con frecuencia, para lograr mejores resultados en la reducción de preparaciones, tienen que hacerse ciertas modificaciones de diseño al producto mismo. La figura 10-19 muestra algunas ideas de reducción de preparaciones; la mayor parte de las preparaciones internas se pueden transformar en externas y el resto de las internas se simplifican.

implantación de la reducción de preparaciones, Para lograr una reducción de preparaciones, se usa un equipo interdisciplinario, el cual es un enfoque probado. Es común incluir entre los miembros del equipo a ingenieros de diseño y manufactura, personal de planta, técnicos, gente de control de calidad, etcétera. La clave es que la reducción de preparaciones es un proyecto y, por lo tanto, debe organizarse como tal.

Resoltados de proyectos de reducción de preparaciones. Los resultados de estos proyectos están publicados y documentados. Por ejemplo, la figura 10-20 muestra los resultados de la reducción de preparaciones en una fábrica de productos para el hogar en la costa oeste (Suzaki, 1987). El esfuerzo inicial redujo 36% el tiempo de preparación. La separación de preparaciones internas y externas tomó cerca de seis meses y redujo los tiempos alrededor del 14% de su valor inicial.

4.7.2 Economía de la reducción de preparaciones

Se presentó la reducción de preparaciones en el contexto del incremento de la flexibilidad del sistema de producción. La flexibilidad no es la única ventaja. Algunos beneficios adicionales son menores inventarios, calidad mejorada e incremento en la capacidad efectiva.

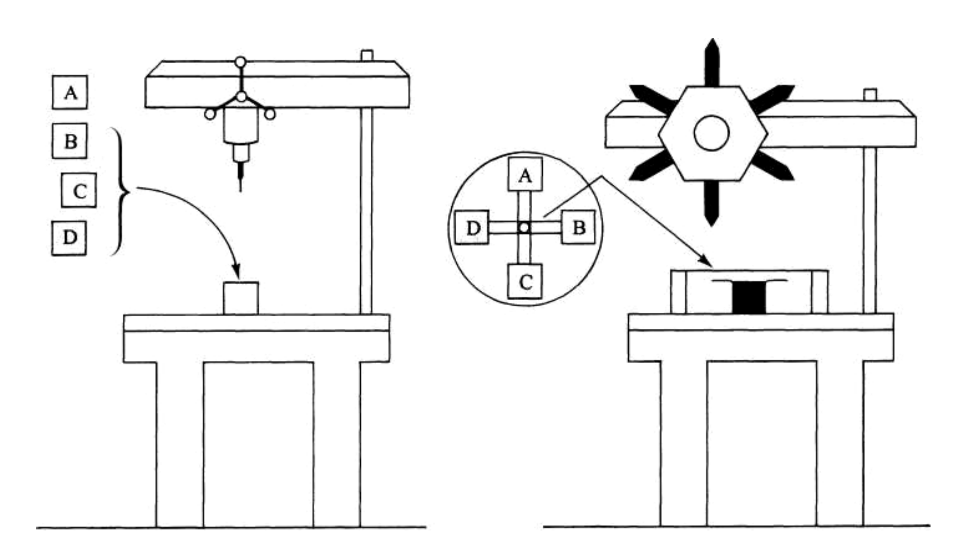


FIGURA 10-19
Reducción de preparaciones [Black (1991) copyright© 1991, reproducido con permiso de The McGraw-Hill Companies, Inc.]

En general, una máquina que tiene cuatro trabajos con cuatro aditamentos necesitaría cuatro preparaciones distintas, que consisten en el cambio de aditamento y la alineación de la herramienta de corte con la pieza de trabajo.

Con el rediseño, se montaron los cuatro aditamentos en una tornamesa y se pueden alinear rápidamente y asegurarse en la posición. Una torreta reemplaza al husillo y un dispositivo de alimentación automática sustituye la rueda manual.

La reducción de preparaciones requiere inversión. Su factibilidad económica depende del valor económico de los beneficios obtenidos. El beneficio económico más directo que debe evaluarse es el costo reducido de mantener inventario. Se presenta un modelo para analizar la ventaja de la reducción de preparaciones relacionada con el costo de mantener inventario. En principio* se puede usar el mismo enfoque para otros beneficios; aunque no es tan sencillo evaluar su equivalencia económica.

El problema que se enfrenta es determinar cuánto se debe invertir en reducir el tiempo de preparación (o, de manera equivalente, el costo de preparación). Éste es, en esencia, un trueque entre el costo de dos inversiones, una en inventario y otra en la reducción de la preparación. Se puede modelar esta situación extendiendo el modelo EOQ para incluir un costo de reducción de preparación además de los costos de preparación y de inventarios. En la formulación de este modelo se sigue el procedimiento sugerido por Porteus.[3]

La ecuación de costo básica presentada para el modelo EOQ era

$$K(Q) = \frac{AD}{Q} + ic\frac{Q}{2}$$

donde $K(Q)$ = costo total anual promedio

D = demanda anual continua determinística (unidades por año)

c = costo unitario

i = costo anual de capital

A = costo de preparación

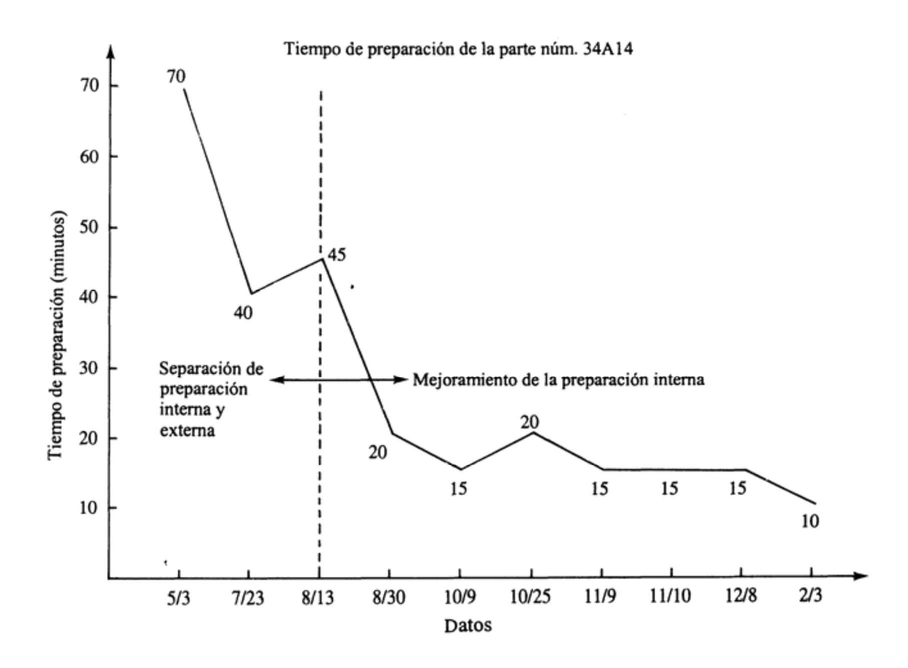


FIGURA 10-20
Beneficios de la reducción de preparaciones [Suzaki (1987), reimpreso con permiso de The Free Press, división de Simón & Schuster, copyright © 1987]

[3] **Reimpreso con permiso, Porteus (1985), Institute of Management Science (actualmente INFORMS), 2 Charles St, Suite 300, Providence, RI, 02904.**

La cantidad económica a ordenar es

$$Q^* = \sqrt{(2AD)/(ic)}$$

Como se observó, reducir *A* disminuye g*.

Suponga que *f(A*)es la inversión requerida para disminuir el costo de preparación a un nivel *A*. El costo anual de esta inversión es *i f(A*), donde í es el costo anual de capital. El costo total anual promedio como una función de *A* y *Q* es

$$K(Q, A) = \frac{AD}{Q} + ic\frac{Q}{2} + i f(A)$$

Se quiere encontrar valores de *Q* y *A* que minimicen *K(Q, A*).

La función *f(A*) puede tomar distintas formas. Un enfoque posible es suponer que es lineal, es decir,

$$f(A) = v(A_0 - A)$$

donde A_0 es el costo de preparación inicial (actual) y *A* es un costo de preparación arbitrario. Porteus (1985) sugirió una forma logarítmica para *f(A*). Sea

$$f(A) = a - v \times \ln(A) \qquad 0 < A < A_0$$

donde a y v son constantes positivas dadas y, como antes, A_0 es el costo de preparación original. Para esta función, se necesita una inversión fija para reducir la preparación en un porcentaje fijo.

Suponga que θ es la inversión fija requerida para reducir 10% el costo de preparación. Si se supone que $f(A_0) = 0$, se obtiene

$$f(A_0) = a - v \times \ln(A_0) = 0$$

o

$$a = v \times \ln(A_0)$$

También se sabe que

$$f(0.9A_0) = a - v \times \ln(0.9A_0) = \theta$$

Al manipular estas dos ecuaciones se encuentra que

$$v = \frac{\theta}{\ln(1/0.9)} = 9.5\theta$$

es decir, v es proporcional a θ, y v es el costo de reducir alrededor de 63% el costo de preparación.

Ahora se puede escribir *f(A*) como

$$f(A) = v[\ln(A_0) - \ln(A)]$$

ecuación que se describe en la figura 10-21. Al sustituir este valor de *f(A*)en la ecuación del costo anual promedio se obtiene

$$K(Q, A) = \frac{AD}{Q} + ic\frac{Q}{2} + i \times v[\ln(A_0) - \ln(A)]$$

*K(Q, A)*es estrictamente convexa en $[0, A_0]$ y tiene un mínimo único (Porteus, 1985). Para

encontrar el mínimo, se obtienen las derivadas parciales, se igualan a cero y se resuelven las dos ecuaciones con dos incógnitas, Q y A. el resultado es

$$A^* = \frac{2i^2v^2}{Dic}$$

y

$$Q^* = \frac{2vi}{ic}$$

Si A^* es mayor que A_0, el procedimiento de preparación actual es mejor. Entonces, el mínimo verdadero está dado por

$$A^* = \text{mín}\,[A_0,\ (2i^2v^2)/(Dic)]$$

y

$$Q^* = \text{mín}\,[\sqrt{(2AD/ic)},\ (2vi/ic)]$$

ic

Ejemplo 10-4. Reducción de preparación en Plasto. La Plasto Company tiene una línea de productos de plástico. Uno de ellos es una base de plástico para videocasetes comerciales, que se fabrica en una máquina de moldeo por inyección. El polímero se presiona contra un dado de metal a alta presión y temperatura elevada. Un dado puede pesar hasta doscientas libras y el tiempo de preparación es alrededor de cinco horas cuando la máquina está ociosa.

Como parte de un programa de mejora continua, Plasto inició una campaña de reducción de desperdicio que incluía la reducción de preparaciones. Un estudio de la actividad de preparación reveló que el proceso constaba de dos etapas. La primera es montar el dado en la máquina, lo que toma

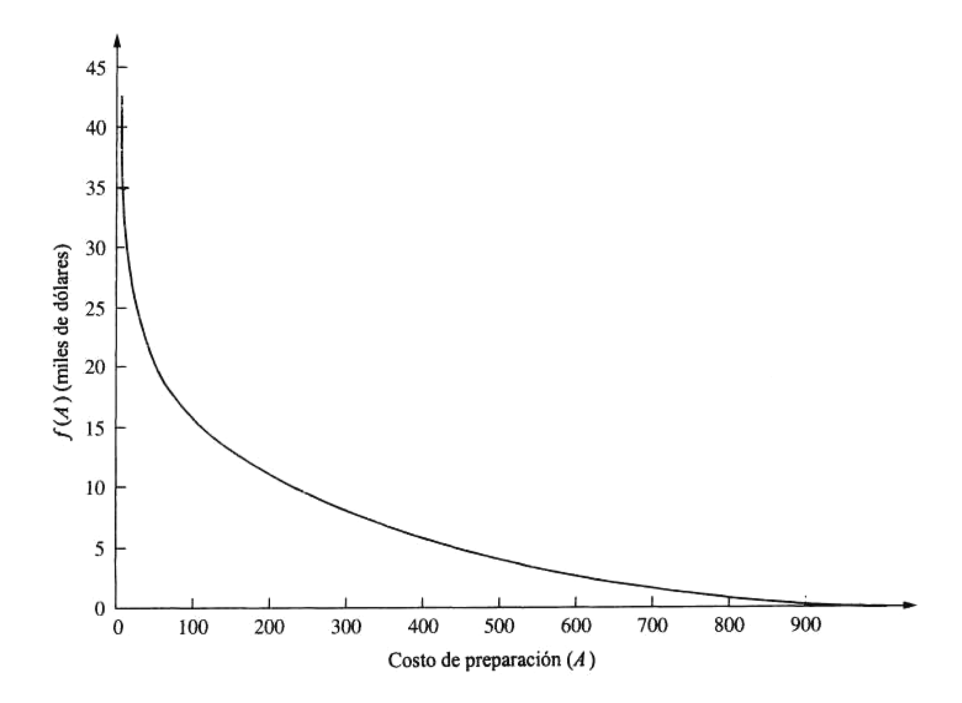


FIGURA 10-21
Gráfica de A contra $f(A)$

cerca de dos horas. La otra es precalentar el nuevo material a la temperatura y humedad requeridas para el proceso. Si el precalentado se transforma en una preparación externa, el tiempo de preparación se puede reducir de manera sustancial. Existen varias alternativas técnicas; cuanto más cuestan, más reducen el tiempo de precalentado. El análisis económico se usa para encontrar cuánto se debe invertir en el precalentado externo.

Al estudiar los datos para este análisis, se encontró que el costo de la reducción de la preparación sigue una función logarítmica. Una reducción de 10% en el costo requiere una inversión de $700(0). Es más, la demanda anual *(D)* es 1000 unidades por año, el costo anual de capital (/) es de 20% al año, el costo unitario (c) es $50 y el costo de preparación actual (A_o) es $ 1000 por preparación.

Solución. Primero se encuentra el valor de v, que es

$$v = 9.5\theta = \$6650$$

Usando las ecuaciones para A^* y Q^*, se tiene

$$A^* = \text{mín}[A_0, (2i^2v^2)/(Dic) = \text{mín}(1000, 354) = \$354$$

y $$Q^* = \text{mín}\left[\sqrt{(2AD/ic)}, (2vi/ic)\right] = \text{mín}(447, 266) = 266$$

Por lo tanto, el costo de preparación se reduce a $354, y la cantidad a ordenar disminuye a 266; la inversión requerida es

$$f(A) = v[\ln(A_0 - \ln(A)] = 6650\,[\ln(1000) - \ln(354)] = \$6746$$

La gráfica de $f(A)$ se encuentra en la figura 10-21.

El costo anual promedio antes de la reducción de preparación es

$$K(Q) = \frac{AD}{Q} + ic\frac{Q}{2} = \frac{1000 \times 1000}{447} + 0.2 \times 50\frac{447}{2} \approx \$4472$$

y el costo promedio anual después de la reducción de preparación es

$$K(Q, A) = \frac{AD}{Q} + ic\frac{Q}{2} + iv[\ln(A_0) - \ln(A)]$$
$$= \frac{354 \times 1000}{266} + 10\frac{266}{2} + 0.2 \times 6650[\ln(1000) - \ln(354)] \approx \$4009$$

Esto da como resultado un ahorro en el costo anual de $463.

Comentario. El tiempo de preparación reducido causa una reducción en la cantidad a producir, lo cual agrega flexibilidad a la línea de producción. Sin embargo, la inversión de $6746, que da un ahorro anual de $463, no es muy atractiva si los fondos son limitados. Pero si se considera que el dispositivo de precalentado puede reducir el costo de preparación para otros productos en la misma máquina, esta inversión puede valer la pena. Todavía más, la disminución en el tiempo de ciclo y el incremento en la flexibilidad que proporciona la reducción de la preparación son ventajas significativas que no se toman en cuenta en la función de costo.

4.8 Software

El software para los sistemas jalar se centra principalmente en el control de planta y por lo común se encuentra como software para JIT, aunque sólo maneje la componente técnica de JIT. Los sistemas jalar se implantaron en un principio como sistemas *kanban* manuales, así el software para JIT tuvo un desarrollo lento. Debido a la planeación miope de JIT (vea la sección 7), con frecuencia, este software es un agregado al MRPII, que sustituye al módulo de control de

planta. La ventaja es que se obtiene un programador poderoso que sincroniza el uso de la capacidad. El resultado de esta fusión es un sistema híbrido conocido como JIT-MRP (o JIT-MRP II). La mayoría de los paquetes comerciales de MRP II actuales incluyen una componente de JIT. Cuando se usa, se puede eliminar el *kanban* manual y usarse un *kanban* electrónico para iniciar la producción o mover el material.

Recientemente surgió el software de JIT en sí; realiza funciones de orden de entrada, programación y control jalar. Su precio va de 1000 a 50 000 dólares. Se pueden ver listas con algunos detalles en Krepchin (1988) y en "Buyer's Guide" (1995). El software para la manufactura que satisfaga las necesidades de JIT está todavía en desarrollo.

4.9 Aplicaciones industriales

Existen numerosas aplicaciones de los sistemas jalar desde su introducción en la industria occidental a principios de los 70. También se cuenta con datos de campo abundantes para obtener una idea de la experiencia general de la implantación del JIT. Se analizarán dos aplicaciones y dos investigaciones.

La primera aplicación es la de Harley Davidson (Reid, 1990), el famoso fabricante de motocicletas. Casi tuvo que cerrar por la competencia japonesa (de Honda y Yamaha) durante los 70. En 1973 Harley Davidson (H-D) tenía 75% del mercado de motocicletas gran turismo, pero se cayó a menos del 25% para el final de la década. Durante estos años y a principios de los 80, la compañía implantó un plan de recuperación riguroso. Una de sus componentes más importantes era JIT, en ambos aspectos, el filosófico y el técnico. H-D llamó a su versión de JIT programa de *material cuando se necesita.* De producir grandes lotes en corridas de producción largas, H-D cambió a lo que llamó sistema de "frijolitos de dulce". La línea de ensamble produciría todos los modelos, en diferentes colores, todos los días. Las otras componentes de JIT que se implantaron incluyeron reducción de desperdicio (reducción de preparaciones y mejoras a la calidad) y participación de empleados. Se usaron sistemas de manufactura celular para acomodar las instalaciones de producción.

Los resultados del plan de recuperación de H-D fueron sorprendentes. De estar en números rojos, la compañía logró números negros. El porcentaje de mercado para fines de los 80 aumentó a más del 50%. La historia de H-D es un ejemplo de implantación exitosa de JIT en Estados Unidos. Se hubiera un salón de la fama para PCP integrada, H-D sería venerada.

La segunda aplicación que se presenta se refiere a una pequeña empresa, Strat Industries, en Australia (Sohal y Naylor, 1992). La compañía emplea a 50 personas y se especializa en diseño, manufactura y ensamble de unidades de control de temperatura central por ductos en ambientes domésticos e industriales. Strat Industries tiene ventaja en calidad y precio sobre sus competidores, pero tenía tiempos de entrega largos que redundaban en ventas perdidas. La compañía producía el mismo producto durante toda una semana. Al final de la semana, cambiaba para construir un producto distinto la siguiente. Para reducir el tiempo de entrega, decidió usar la filosofía de manufactura JIT. Al hacerlo, encontró factible un modelo mixto de ensamble, y secuenciaron los productos para cumplir con los requerimientos de sus clientes.

La inversión en la implantación fue mínima, pues se empleó un sistema *kanban* manual. El tiempo de entrega se redujo de 10 a tres días, lo que aumentó las ventas y las ganancias un 30%. El inventario se redujo 60% y el trabajo en proceso bajo a 40 horas trabajadas. El ensamble con el modelo mixto ha dado flexibilidad en la programación y en la producción. Cuando se publicó este informe, los esfuerzos de mejora continuaban *(kaizen).*

Esto muestra que JIT es adecuado para la empresa pequeña, y su implantación no merma los recursos de capital. Por las cifras reportadas, el retorno sobre la inversión debe haber sido considerable.

Crawford *et al.* (1988) informan sobre los resultados de una encuesta realizada entre quienes primero implantaron JIT en Estados Unidos. La investigación identifica problemas de implantación y operación. Fueron 39 las respuestas obtenidas de la encuesta; todos estaban en el proceso de implantar JIT. La mayor parte de las empresas encuestadas son de los sectores automotriz y electrónico y emplean entre 60 y 10 000 personas. Algunos de los beneficios de JIT, según las respuestas, son reducción promedio de 41% en inventario y 40% en el tiempo de entrega, 26% de incremento en la calidad del producto, reducción promedio del 30% en espacio de almacén y un incremento promedio de 54% en el margen de utilidades. Esto significa un incremento sustancial en la posición competitiva para las compañías. El informe también identifica problemas de implantación (como resistencia al cambio y falta de compromiso de la administración) y algunos problemas operativos (como baja calidad, exactitud en los datos y medidas de desempeño).

Una encuesta realizada por White (1993) consistió en una muestra de 1035 organizaciones en Estados Unidos que adoptaron JIT. Más del 80% de las organizaciones informan haber implantado una reducción en la preparación, empleados con funciones múltiples y control total de calidad. La mayoría de los que respondieron (86.4%) indica que JIT proporcionó un beneficio neto global para su organización. Informan que el tiempo de producción disminuyó 60% en promedio y que cada vez más las organizaciones con procesos de manufactura repetitivos adoptan prácticas de JIT.

La conclusión de las dos encuestas es que JIT es ya una práctica arraigada en Estados Unidos.

SECCIÓN 4 EJERCICIOS

10.22. ¿Qué impulsa el inicio de la producción en cierta estación de trabajo en un sistema jalar?

10.23. Describa el impacto de los amortiguadores en el desempeño de un sistema jalar. ¿Cómo puede determinarse el tamaño de estos amortiguadores?

10.24. Explique cómo se relacionan los siguientes términos con el éxito de la implantación de JIT:

- Eliminación de desperdicio
- Participación de los empleados en la toma de decisiones
- Participación de los proveedores
- Control total de la calidad

10.25. Los siguientes elementos se pueden describir como "piedras" (vea la figura 10-12):

- Máquinas poco confiables
- Baja calidad
- Demanda fluctuante
- Tiempos de entrega largos
- Tiempos de entrega largos de los proveedores

Para cada elemento, explique por qué el trabajo en proceso es análogo al "agua que cubre las piedras". ¿Cómo puede la reducción del trabajo en proceso revelar estos problemas?

10.26. ¿Por qué está mal tener niveles altos de trabajo de proceso? ¿Es posible operar un sistema de manufactura casi sin trabajo en proceso? ¿Por qué?

10.27. El nivel de trabajo en proceso en un sistema *kanban* está acotado. ¿Por qué?

10.28. Explique por qué deben cumplirse las siguientes condiciones para implantar con éxito un sistema ***kanban:***

- Fluctuaciones pequeñas en la demanda
- Preparaciones muy cortas o ninguna
- Alta calidad

10.29. ¿Cuál es la diferencia entre el método *kanban* de una sola tarjeta y el de tarjetas duales?

10.30. ¿Qué elementos de control se pierden cuando se usa una sola tarjeta *kanban* en lugar de las duales?

10.31. La reducción en el trabajo en proceso se puede lograr reduciendo a, *C* o ¿.¿Cuáles serían las im plicaciones de reducir *C* (capacidad del contenedor) al mínimo?

10.32. Gear, Inc. produce transmisiones para automóvil. Ensamblan cuatro transmisiones en la misma lí nea sin preparaciones. Estas transmisiones son una automática de cuatro velocidades (A4), una automática con sobremarcha (AS), una estándar de cuatro velocidades (E4) y una estándar de cin co velocidades (E5). La proyección de la demanda para la próxima semana es 150,300,250 y 400 para A4, AS, E4 y E5, respectivamente. Establezca una secuencia que proporcione un flujo suave para línea de ensamble.

10.33. MaTell fabrica tres productos en una sola línea de producción: un teléfono de mesa (M), un teléfo no de pared (P) y una contestadora (C). Ellos han convertido esta línea en una verdadera línea JIT; hacen un producto a la vez sin preparaciones para los distintos productos. Para el próximo mes, la demanda de los tres productos será estable en 675, 525 y 350 para M, P y C, respectivamente. ¿Qué secuencia de productos recomendaría?

10.34. Analice las ventajas y desventajas de la formulación de la fecha de entrega y la formulación Mon den para el modelo mixto del problema de secuenciación.

10.3 5. Pruebe que la secuencia EDD minimiza el cuadrado de la desviación de las fechas de entrega ideales para el modelo mixto del problema de secuenciación.

10.36. Sea D = 300 unidades por día, t_w = 0.78 días y t_p = 0.11 días. El tamaño del contenedor es 15 uni dades y a = 0.06. Se sabe que una unidad de trabajo en proceso cuesta $2 por día. Es posible redu cir t_w en 0.08, a 0.7 días y costaría $2500. ¿Cuál es el periodo de recuperación?

10.37. Se estima que la demanda crecerá a 330 unidades por día en el siguiente año. En este caso, la deci sión es incrementar el número de *kanbans* y no usar tiempo extra. Entonces, ¿cuál sería el periodo de recuperación?

10.38. ¿Qué impulsa enviar trabajos a producción en una línea de manufactura basada en CONWIP?

10.39. ¿Cuál es el papel de la lista de faltantes en un sistema CONWIP?

10.40. ¿Cuáles son los beneficios de un sistema controlado por CONWIP en un entorno de manufactura de modelo mixto?

10.41. Se mostró que el tiempo de flujo en un sistema CONWIP es bastante robusto. Explique por qué. *(Sugerencia:* utilice la ley de Little.)

10.42. En un sistema CONWIP los contenedores no son específicos para los números de parte, al contra rio del sistema *kanban.* ¿Cuáles son las implicaciones de esta diferencia? Explique en detalle.

10.43. El trabajo en proceso en un sistema CONWIP no se controla por número de parte. En qué afecta esto el nivel de servicio (en términos de la probabilidad de que al llegar un cliente el artículo esté disponible)?

10.44. CONWIP se considera aplicable a los entornos de producción que se caracterizan por preparacio nes más largas y demanda fluctuante. ¿Por qué?

10.45. Un beneficio importante de CONWIP es la baja variablidad del tiempo de flujo. ¿Por qué es tan importante?

10.46. La líneas CONWIP se caracterizan por menos trabajo en proceso comparadas con líneas *kanban* similares en un entorno de producción de modelo mixto. ¿Por qué?

10.47. CONWIP se considera un sistema autorregulatorio, ¿Por qué?

10.48. Muestre que en un sistema CONWIP, un contenedor que llega a la máquina cuello de botella debe esperar (||«|| - *n)*^ unidades de tiempo, donde ||n|| es el entero más pequeño mayor o igual a *n*

10.49. ¿Cuál es la diferencia entre la preparación interna y la preparación externa?

10.50. ¿Cuáles son los pasos a seguir para reducir una preparación?

10.51. Si *D* = 100 unidades por día, el costo de preparación es igual a $20 por lote y el costo de mantener inventario de una parte es $2 por día.

a) ¿Cuál es el tamaño del lote óptimo?
b) ¿Cuál es el costo total por día?
c) ¿Cuál sería el costo total si el costo de preparación bajara 15%?
d) ¿Cuál sería el costo total si el costo de inventario bajara 15%? ¿Cuál es su conclusión?

10.52. Sea *D* la demanda total diaria, *A* el costo de preparación por día, *c* el costo de cada parte e *i* la tasa de interés. Como resultado de un proceso de mejoras, es posible reducir 10% el costo de prepara ción. Sin embargo, esto causaría un incremento de *g* dólares en el precio de cada parte. ¿Cuál debe ser el valor crítico de *g* como función de cpara que el proceso de mejoras valga la pena?

10.53. Una función logarítmica es más adecuada para describir la función de costo de una reducción de preparación. Explique por qué.

10.54. Suponga que la función de costo de reducción de preparación es *f(A)* = *a* - v • ln *(A)*, muestre que v es el costo por reducir 63% el costo de preparación.

10.55. Para la función de costo total

$$K(Q, A) = \frac{AD}{Q} + ic\frac{Q}{2} + iv[\ln(A_0) - \ln(A)]$$

demuestre que

$$A^* = \text{mín}\left\{A_0, \frac{2i^2v^2}{icD}\right\}$$

y

$$Q^* = \text{mín}\{\sqrt{(2AD/ic)}, (2iv/ic)\}$$

5 SISTEMAS DE CUELLO DE BOTELLA

5.1 Filosofía

En este momento, deben ser evidentes una estructura estándar de PCP integrada, una componente técnica y un concepto administrativo. Los sistemas de cuello de botella no son diferentes. Se presenta uno de los enfoques más conocidos, aunque existen otros. La componente técnica de este enfoque es un programador de **cuello de botella** conocido como *optimizedproduction technology* (OPT) o *tecnología de producción optimizada.* El concepto administrativo se llama teoría de la restricciones (TOC).

La filosofía detrás de OPT y TOC es una meta -de hecho, *la meta* es: "haz dinero en el presente lo mismo que en el futuro" (Goldratt y Cox, 1986). La fortaleza de TOC es que una meta sencilla y directa es una guía consistente y poderosa para desarrollar sus conceptos y herramientas. Todavía más, para lograr la meta, la compañía debe, al mismo tiempo, aumentar la producción, reducir el inventario y disminuir los gastos operativos. Estos puntos están más allá de cualquier argumento. TOC, junto con OPT, se desarrollaron para lograr esta meta.

Eliyahu Goldratt desarrolló el sistema de programación OPT en Israel, a principios de los 70. La historia es que Goldratt, un físico israelí, se involucró por primera vez con los sistemas de producción al ayudar a un amigo que tenía una planta para fabricar cubitos de pollo. En 1979, Goldratt introdujo OPT en Estados Unidos y fundó Creative Output, Inc. (COI), para comercializarlo. El desarrollo de OPT y más tarde TOC fue, casi exclusivamente, el trabajo de Goldratt.

La premisa de OPT es que los cuellos de botella en la producción son la base para la programación y la planeación de la capacidad. Los recursos se clasifican como los que son cuello de botella y los que no lo son. Los recursos de cuello de botella se programan a su máxima utilización, y el resto se programan para servir al cuello de botella. Esto significa que en algunos casos los recursos que no son cuellos de botella pueden estar ociosos. El objetivo de máxima eficiencia para todas las máquinas ya no se satisface. OPT es en esencia un sistema de software, pero la aplicación de algunos de sus principios no necesariamente requiere software.

A mediados de los 80, OPT había madurado en una filosofía administrativa más comprensible. En palabras del propio Goldratt (1988)

> Quizá el resultado más importante fue la formulación de lo que yo considero una teoría global para manejar una organización. La llamo teoría de las restricciones y veo todo lo que hice antes como un derivado de esta teoría.

La base de TOC es su definición de restricción: "cualquier cosa que limita un sistema para lograr un desempeño más alto en el cumplimiento de su meta". TOC es una manera de manejar las restricciones del sistema. La influencia de OPT es clara; después de todo, un cuello de botella es un tipo de restricción en la planta, y OPT es un método para manejar esta restricción. A continuación se hacen análisis más detallados de OPT y TOC.

5.2 Los principios del cuello de botella: OPT

Cuello de botella es un término que se encuentra con frecuencia. Un puente puede ser un cuello de botella para el paso de vehículos, un línea de teléfono puede ser un cuello de botella en la comunicación, y una caja registradora en una tienda de departamentos puede ser un cuello de botella para los clientes. Un cuello de botella se asocia con una cadena de eventos. Es la componente de la cadena que permite, por una u otra razón, que ocurran menos eventos que el resto de las componentes.

El OPT distingue entre dos tipos de restricciones, cuello de botella y recurso restringido de capacidad. El cuello de botella se aplica al caso en que la capacidad de los recursos es menor o igual que la demanda del mercado, es decir, un cuello de botella es un recurso que restringe la producción.

Un **recurso de capacidad restringida** es un recurso que se ha convertido en cuello de botella como resultado de la utilización ineficiente. Para simplificar, sólo se usará el término cuello de botella.

OPT no es el primer método que identifica y estudia los cuellos de botella. En la programación de un proyecto se identifica la ruta crítica. Es obvio que cada actividad en la ruta crítica es una actividad cuello de botella. Más aún, cualquier retraso en una actividad crítica retrasará el tiempo de terminación del proyecto. Por otro lado, para acortar la duración del proyecto, debe acortarse la duración de al menos una actividad cuello de botella. Estos conceptos se incorpo-

TABLA 10-4

"J	Se balancea el flujo, no la capacidad.
2	Las restricciones determinan la utilización de lo que no es cuello de botella.
3	Utilización y activación de un recurso no son sinónimos.
4	Una hora perdida en un cuello de botella es una hora perdida en todo el sistema.
5	Una hora ahorrada en donde no hay cuello de botella es un espejismo.
6	Los cuellos de botella gobiernan la producción y el inventario en el sistema.
7	El lote transferido puede, y muchas veces debe, no ser igual al lote del proceso.
8	El lote del proceso debe ser variable, no fijo.
9	Deben establecerse programas observando todas las restricciones. Los tiempos de entrega son el resultado de un programa y no pueden predeterminarse.

Fuente: Jacobs (1984), reimpreso con permiso del Institute of Industrial Engineers, 25 Technology Park/Atlanta, Norcross, GA, 30892, copyright © 1984

ran a las reglas de OPT. La tabla 10-4 contiene la lista de las reglas de OPT, formuladas para lograr la utilización máxima del cuello de botella.

La influencia de los conceptos de la ruta crítica se puede ver en algunas reglas. La regla 7 es tal vez la más revolucionaria. En MRP, todas las técnicas de tamaño de lote suponen tamaños iguales para los lotes transferidos y procesados. OPT también difiere de MRP en que no usa tiempos de entrega predeterminados (regla 9). Se profundiza en las reglas de OPT a través de los siguientes ejemplos.

Ejemplo 10-5. Reglas de OPT. Este ejemplo estudia las reglas 2,3,4 y 5 de OPT. Considere un taller de producción intermitente que tiene un torno (R), un taladro (T) y una fresa (F) (figura 10-22). Se ensamblan dos productos. El producto A se ensambla de dos componentes barrenadas y dos componentes cortadas en el torno. El producto B se ensambla de una componente fresada y dos componentes cortadas en el torno. La secuencia de producción es

$$F + R \rightarrow A$$
$$T + R \rightarrow B$$

Así, R es un recurso común. El taller tiene dos fresas, un torno y un taladro, y opera tres turnos diarios (1440 minutos). La demanda es 500 unidades por día de A y 50 unidades por día de B. La siguiente tabla describe la carga del taller:

	Tiempo de proc. unitario		**Unidades req. para ensamble**		**Tiempo de procesado total**				
	A	**B**	**A**	**B**	**A**	**B**	**Total**	**Disp.**	**Utilización**
Ensamble	2	4	1	1	600	200	800	1440	55.65%
Fresa	4	0	2	0	2400	0	2400	2880	83.33%
Torno	3	3	2	1	1800	150	1950	1440	135.42%
Taladro	0	10	0	2	0	1000	1000	1440	69.44%

El torno es un recurso cuello de botella y no puede cumplir la demanda diaria. El taller puede hacer 215 artículos A y 50 artículos B (¡verifique!). La utilización del torno será del 100% y la utilización de las otras máquinas será menor (regla 2). Es evidente que la activación de los recursos puede hacerse a distintos niveles de utilización (regla 3). Como el torno opera ahora a toda la capacidad, el tiempo que se pierda ahí disminuirá la producción del taller (regla 4). De manera similar, intentar hacer más eficientes operaciones que no son cuellos de botella no contribuirá en nada a la producción (regla 5).

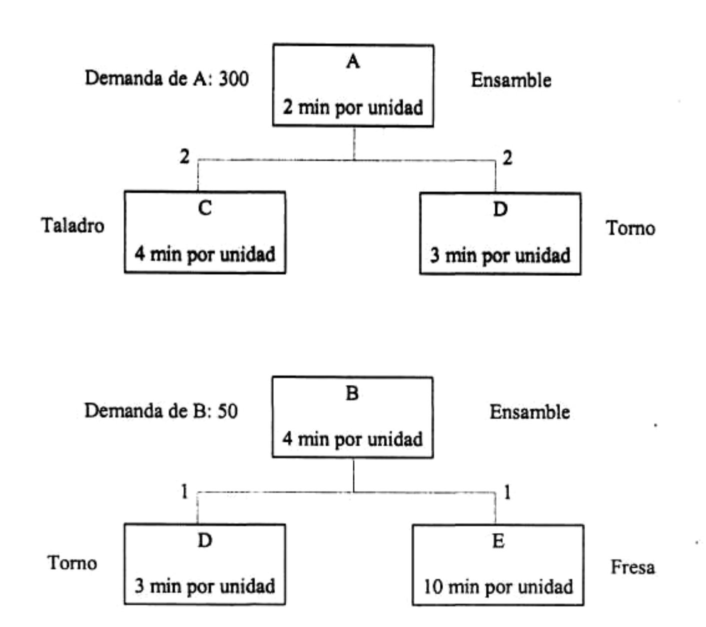


FIGURA 10-22
Ejemplo de OPT

Ejemplo 10-6. Regla 7 de OPT. En este ejemplo se muestra la regla 7. Considere el siguiente proceso de producción: tres operaciones en secuencia, cada una toma un minuto por unidad. En el primer caso, el lote de procesado de 10 es igual a lote de transferencia. En el segundo caso, el lote de procesado es de 10 unidades pero el de transferencia es de 5. El tiempo de entrega de producción para las dos políticas se muestra en las gráficas de Gantt de la figura 10.23. Al hacer el lote de transferencia más pequeño que el de producción, el tiempo de entrega se reduce de 30 a 20 minutos.

5.3 Teoría de restricciones (TOC)

La teoría de restricciones es una extensión y mejora al OPT. Otros nombres para TOC son **manufactura sincrónica o producción sincronizada.** TOC puede verse como una filosofía construida alrededor de una guía y diseñada para crear un proceso de mejora continua.

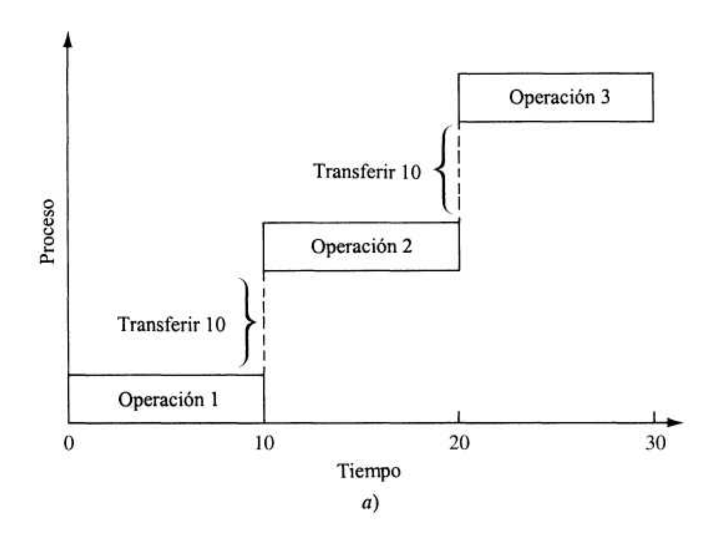
La premisa básica de TOC es que la salida del sistema está determinada por sus restricciones. La definición de restricción sugiere que TOC tiene una aplicación más amplia que la planeación y control de la producción. Se identifican tres grandes categorías de restricciones:

La premisa básica de TOC es que la salida del sistema está determinada por sus restricciones. La definición de restricción sugiere que TOC tiene una aplicación más amplia que la planeación y control de la producción. Se identifican tres grandes categorías de restricciones:

Restricción de recursos interna: éste es el clásico cuello de botella: máquina, trabajador o incluso una herramienta.

- **Restricción de mercado:** la demanda del mercado es menor que la capacidad de producción. En este caso el mercado dicta el ritmo de producción.

Restricción de política: una política dicta la tasa de producción (por ejemplo, una política de no trabajar horas extra.



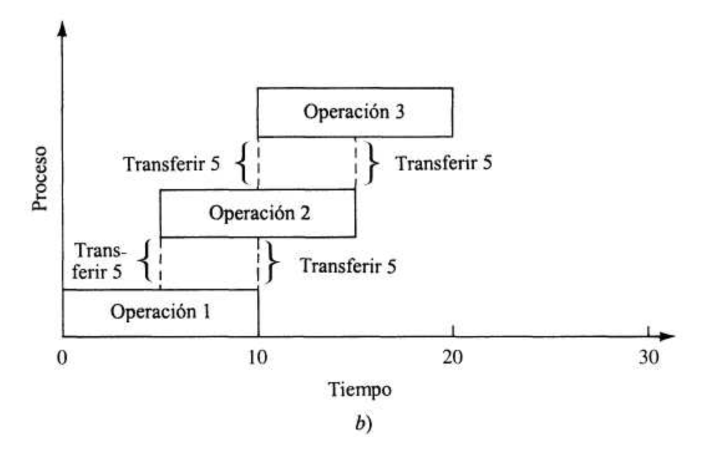


FIGURA 10-23
Gráficas de Gantt para lotes de producción y transferencia iguales y diferentes: *á)* lote de proceso = 10, lote de transferencia = 10; *b)* lote de proceso = 10, lote de transferencia = 5

TOC se centra en el papel que juegan las restricciones en los sistemas con el fin de mejorar el desempeño del mismo hacia la meta. Para evaluar el mejoramiento, se proponen dos tipoi de medidas de desempeño: medidas financieras y medidas operacionales. Las medidas fmanpieras que se usan son las clásicas: ganancia neta, rendimiento sobre la inversión y flujo de efecti vo. Se sugieren las siguientes medidas operacionales nuevas:

- **Salida:** ésta es la tasa a la que el sistema genera el *dinero* a través de las ventas. El produc to no vendido no es salida.
- **Inventario:** éste es el dinero que el sistema ha invertido en comprar cosas que piensa yender; mide el inventario sólo en términos del costo material, sin tomar en cuenta la mano de obra ni los gastos generales.
- **Gastos de operación:** éste es el dinero que el sistema gasta con el fin de convertir el inven tario en salida, incluyendo todo, mano de obra, gastos generales y otros.

Observe que las medidas de eficiencia, tales como la utilización de recursos, *no* son parte de las medidas operacionales.

Para la mejora continua Goldratt desarrolló cinco paso de TOC:

1. Identificar las restricciones del sistema.
2. Decidir cómo explotar las restricciones del sistema.
3. Supeditar todo lo demás a la decisión tomada en el paso 2.
4. Elevar las restricciones del sistema. El término *elevar* significa hacer posible el logro de un desempeño más alto respecto a la meta.
5. Si en los pasos anteriores se ha violado una restricción, se regresa al paso 1. No debe per mitirse que la inercia se convierta en una restricción.

TOC sugiere ciertas técnicas específicas para ayudar a la implantación de los cinco pasos. Estas técnicas incluyen análisis de causa y efecto, nubes que se evaporan, administración de amortiguadores y **tambor-amortiguador-cuerda.** Esta última técnica se estudiará más adelante. Los detalles de las otras técnicas se pueden encontrar en Fogarty *et al* (1991).

Para llegar a una mejor comprensión de los cinco pasos de TOC, se usa el ejemplo 10-7. Luebbe y Finch[4] desarrollaron este ejemplo basándose en un problema anterior estudiado por Goldratt. Lo novedoso en este ejemplo es que sigue el procedimiento de TOC usando el enfoque de programación lineal.

Ejemplo 10-7. Pasos de TOC. Considere el proceso de producción descrito en la figura 10-24. Se fabrican dos productos, *Py Q*; la demanda semanal es 100 unidades de *P* y 50 unidades de *Q*. El precio de venta de Py *Q*,respectivamente, es $90 y $100. Se cuenta con cuatro centros de trabajo, *A*, *B*, *CyD*. Cada centro de trabajo tiene una máquina que puede operar hasta 2400 minutos por semana. Se requieren tres tipos de materia prima. Los costos, rutas y tiempos de procesado de la materia prima en cada centro de trabajo se muestran en la figura 10-24.

Con la meta de ganar dinero siempre presente, se determinará la mezcla de productos más rentable, siguiendo los cinco pasos de TOC.

Paso 1. Se identifican las restricciones del sistema. Para identificar las restricciones del sistema, se evalúa la carga semanal en cada máquina (vea la tabla 10-5), y se genera el perfil de recursos de capacidad. El cuello de botella evidente es el centro de trabajo B. Para satisfacer la demanda del mercado de P y Q, debería tener 25% de capacidad adicional.

[4]Adaptado de Luebbe y Finch (1992), con el amable permiso de Taylor & Francis.

TABLA 10-5
Carga semanal

Recurso	Minutos por semana		Carga del proceso por semana	Tiempo disponible por semana	Porcentaje de carga por semana
	P	*Q*			
A	1500	500	2000	2400	83
B	1500	1300	3000	2400	125
C	1500	250	1750	2400	73
D	1000	250	1250	2400	52

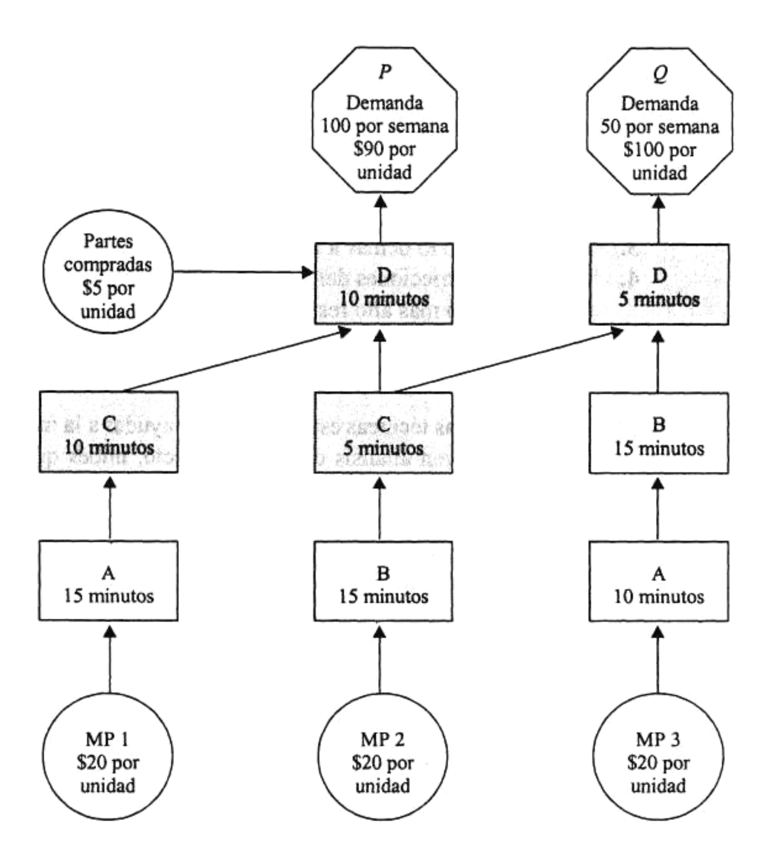


FIGURA 10-24
Ejemplo de TOC

TABLA 10-6
Contribución

Producto	***P***	***Q***
Precio de venta (dólares)	90	100
Costo de materiales (dólares)	45	40
Contribución (dólares)	45	60
Tiempo (recurso B en minutos)	15	30
Dólares por minuto de restricción	3	2

La programación lineal también se puede usar para demostrar que B es el cuello de botella. Con la meta de ganar dinero en mente, se usa maximización de la ganancia como la función objetivo de PL. La contribución, dada en la tabla 10-6, se usará para representar la ganancia por unidad.

La función objetivo es maximizar (45P + 600. Las restricciones son las capacidades de las cuatro máquinas y la demanda de mercado para cada producto. La formulación completa de PL es:

Maximizar (45P + 600

sujeta a

15P + lOg + 5,= 2400 (recurso A)

15P + 30fi + S_2= 2400 (recurso B)

15P + 5g + S_3 = 2400 (recurso C)

$$
\begin{array}{rll}
10P + 5Q + S_4 = & 2400 & \text{(recurso D)} \\
P + S_5 = & 100 & \text{(demanda de P)} \\
Q + S_6 = & 50 & \text{(demanda de Q)} \\
P, Q, S_i \geq & 0 &
\end{array}
$$

donde las S_i son las variables de holgura.

La solución lleva a P=100, 0 = 30, $S_1 = 600$, $S_2 = 0$, $S_3 = 750$, $S_4 = 1250$, $S_5 = 0$ y $S_6 = 20$. El valor $S_2 = 0$ indica que el recurso B es una restricción limitante o el cuello de botella. $S_5 = 0$ significa que se satisface la demanda del mercado para el producto *P*. $S_6 = 20$ dice que, debido al cuello de botella, la demanda del mercado para el producto *Q* no se cumple por 20 unidades.

Paso 2. Se decide cuánto explotar las restricciones del sistema. TOC se basa en la premisa de que el desempeño de un sistema se determina por sus restricciones. Se centra en la maximización del uso de las restricciones en relación con la meta (es decir, obtener dinero). Explotar B significa maximizar el rendimiento por unidad de B consumida. En la tabla 10-6 se calcula la contribución por minuto restringido que da $3.00 para*P* y $2.00 para *Q*. Es más rentable producir todo lo que sea posible de *P* (esto es, 100 unidades) antes de producir *Q*. Las 100 unidades *P* consumen 1500 minutos restringidos, y dejan 900 minutos para *Q*, lo cual es equivalente a 30 unidades de *Q*. Se puede observar que, en este caso, la regla de explotar la restricción da la misma solución que el modelo de programación lineal.

Paso 3. Se supedita todo lo demás al paso 2. Este paso se realiza con la intención de asegurar que explotar la restricción sea una guía para las demás decisiones: compra de materia prima, programación de centros de trabajo, etcétera. Se quiere mantener la restricción ocupada y, al mismo tiempo, conservar un "buen valor" para las medidas operacionales mencionadas. La técnica TOC usada para explotar la restricción es tambor-amortiguador-cuerda (TAC), que se estudiará más adelante.

Paso 4. Se elevan las restricciones del sistema. Todo el esfuerzo que se hace en este paso está encaminado a lograr un mejor desempeño de la restricción respecto a la meta: reducción de tiempo de preparación, mantenimiento preventivo, etcétera, por mencionar algunas posibilidades. Un enfoque distinto es mover, si se puede, los trabajos con la menor ganancia por minuto restringido fuera del cuello de botella a otras máquinas. Así, en el ejemplo, si la demanda del producto *P* pudiera incrementarse a 150 unidades por semana, una forma de manejar la demanda adicional sería cambiar el producto *Q* a otros recursos. El producto *Q* tiene una ganancia menor por minuto de restricción. Al cambiar el trabajo de un recurso restringido a uno no restringido, aumenta el rendimiento generado por el taller, con muy poco o sin incremento en los gastos de operación.

Paso 5. Si se logra romper una restricción, se va al paso 1. Suponga que la demanda del mercado para los productos *P y Q* aumenta a 132 y 66, respectivamente. También, a través de mejoras de ingeniería, los tiempos de procesado en el recurso B se reducen a un tercio del valor original. Es sencillo verificar que el perfil de la capacidad es

Porcentaje de carga por semana	
Recurso A	**110.00**
Recurso B	**55.00**
Recurso C	**96.25**
Recurso D	**68.75**

El recurso A es ahora la restricción, ya que la restricción anterior (recurso B) se rompió. El proceso regresa al paso 1. Sin este paso, se puede continuar con la programación de la producción como si la restricción del sistema fuera todavía el recurso B; esto daría fin al proceso de mejoras y la inercia se establecería en el sistema.

5.4 Técnica TAC

Tambor-amortiguador-cuerda (TAC) es una técnica de control de producción para implantar los pasos de explotación, supeditación y elevación de TOC. Si el sistema tiene un cuello de botella, éste se convierte en un punto de control natural. Su tasa de producción controla el ritmo del sistema. En otras palabras, el cuello de botella marca las pulsaciones que controlan el sistema, de ahí el nombre de **tambor** para este punto de control. La razón para usar el cuello de botella como punto de control es garantizar que las operaciones anteriores produzcan lo suficiente para crear un inventario antes del cuello de botella, para que no quede hambriento. Esto es congruente con la regla 6 de OPT: "los cuellos de botella gobiernan tanto la salida como el inventario en el sistema".

La característica más importante del TAC es que un lote de proceso no necesariamente es igual al lote de transferencia (regla 7). Se presentará una definición precisa de ambos términos:

> Un **lote de** proceso es el número de unidades producidas entre dos preparaciones consecutivas. Un **lote de transferencia** es el número de unidades transportadas entre dos estaciones de trabajo adyacentes. En muchos sistemas de manufactura, lotes de proceso y de transferencia son iguales.

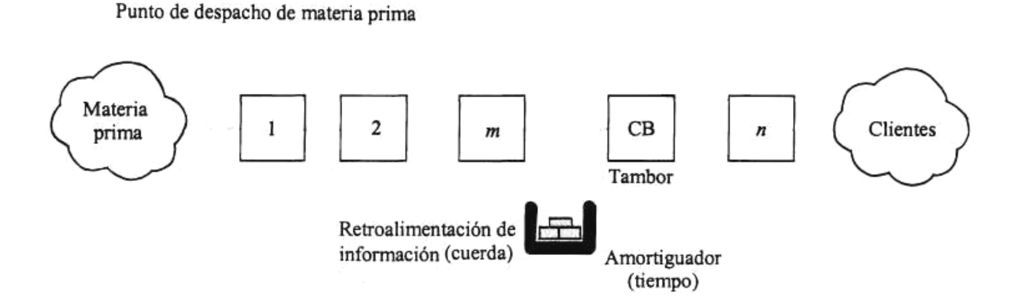
El lote de transferencia se basa en la *parte.* El lote de proceso se basa en el *proceso.* Considere, por ejemplo, una línea de ensamble. Según las definiciones anteriores, el lote del proceso es infinito y el lote de transferencia es *¡uno!*

La técnica TAC es, en esencia, un sistema de retroalimentación. La figura 10-25 describe esta operación. La línea de producción mostrada en esa figura tiene una operación cuello de botella (CB), con un **amortiguador** colocado antes. El propósito del amortiguador es proteger el cuello de botella de fluctuaciones y variaciones en su tasa de alimentación (es decir, explota la restricción).

El tamaño del amortiguador se mide en tiempo estándar, el tiempo requerido por el cuello de botella para procesar todos los artículos que hay en el amortiguador. El amortiguador está conectado con el punto de despacho de la materia prima al principio de la línea de producción a través del ciclo de retroalimentación llamado **cuerda.** Este ciclo de retroalimentación comunica la producción en el cuello de botella con el punto de despacho de la materia prima. El punto de despacho envía sólo la cantidad determinada para mantener el inventario del amortiguador. El tamaño sugerido del amortiguador es *VA* del tiempo de entrega total real del sistema. Entonces, si toma ocho horas recorrer del punto de despacho al final de la línea, el tamaño del amortiguador debe ser de dos horas. Si todo funciona como se planeó, el ciclo de retroalimentación determinará el ritmo de despacho, y el tamaño del amortiguador no cambiará. Sin embargo, si el tamaño del amortiguador baja de este tamaño recomendado, debe tomarse una acción correctiva para acelerar la salida de material y establecer y corregir la causa del retraso.

No existe una base teórica para el tamaño sugerido del amortiguador. La mejor manera de determinarlo es mediante experimentación. Se comienza con un nivel alto del amortiguador, se verifica el intervalo de las variaciones y se reduce si es posible.

Si el cuello de botella es en realidad un recurso restrictivo de la capacidad (RRC), TAC sugiere agregar un amortiguador de producto terminado al final de la línea. Esto se muestra en la figura 10-26. En este caso el tambor es el mercado y hay otro ciclo de retroalimentación para las RRC. El amortiguador de tiempo protege la salida, y el inventario de producto terminado protege el mercado; cuando existe demanda, se dispondrá de productos terminados. Aquí, el mercado es el tambor y la cuerda hacia el RRC establece el ritmo de producción.



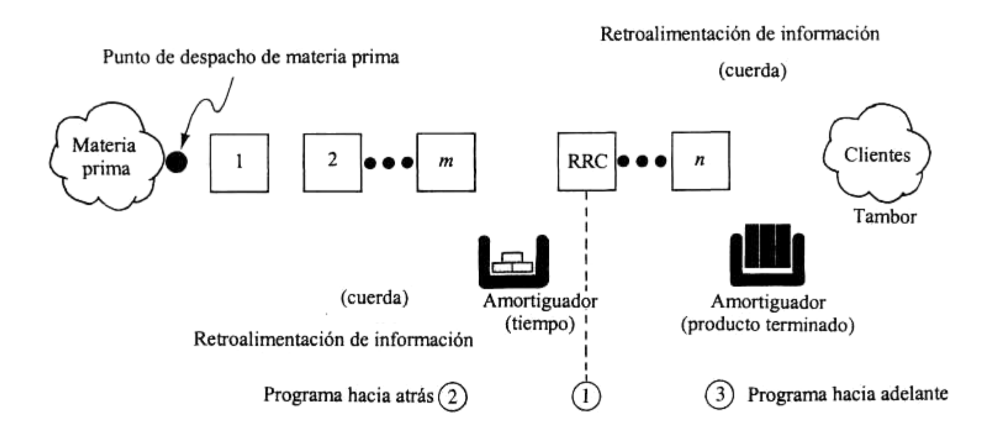
Técnica TAC

Cuello de botella

La programación TAC comienza por programar el cuello de botella (restricción). Después se programan las operaciones hacia atrás, desde el cuello de botella hasta el punto de despacho de la materia prima y, después, hacia adelante hasta el envío. El programa hacia adelante proporciona estimaciones de las entregas de los clientes. Entonces TAC se puede ver como una combinación de jalar y empujar. El despacho de materiales está gobernado por jalar y de ahí en adelante es empujar.

Para concluir, la programación TAC consta de cuatro pasos: identificación de restricciones, programación de restricciones, decisión sobre la restricción de tamaño de amortiguador y decisión sobre el tamaño del amortiguador de envío.

Mientras más cuellos de botella se tengan en un sistema, más difícil será su programación. La práctica ha demostrado que, por lo general, no hay muchos cuellos de botella en la producción real y en las líneas de ensamble. Una buena cifra aproximada es cinco o seis. Todavía más, estas restricciones muy rara vez interactúan. Aun así, programar cinco restricciones (y el resto del sistema) es bastante esfuerzo. Ahí es donde el sistema de software juega un papel importante.



Procedimiento de programación:
1) Se programa el RRC.
2) Se programa hacia atrás hasta el punto de despacho de la materia prima.
3) Se programa hacia adelante hasta el amortiguador de producto terminado.

TAC con dos ciclos de retroalimentación

5.5 Programación de cuellos de botella

Se sabe que el cuello de botella es importante; una máquina cuello de botella debe determinar el programa para toda la planta. Se presentará un método para programación de cuellos de botella.

Si es posible programar la máquina cuello de botella de manera efectiva, las otras máquinas se pueden ajustar a este programa. Las máquinas posteriores al cuello de botella se programan hacia adelante, por ejemplo, siguiendo las reglas de despacho. Las anteriores al cuello de botella se programan hacia atrás usando las fechas de entrega como en MRP. Se estudiará una versión sencilla de un algoritmo de cuello de botella. Versiones más complejas se pueden encontrar en Adams *et al.* (1988) y Morton y Pentico (1993).

5 5.1 Detección de la máquina cuello de botella

En la planta de manufactura, con frecuencia es sencillo encontrar la máquina cuello de botella; camine por la planta y montones de trabajo en proceso estarán apilados antes del cuello de botella. Otro enfoque es estimar la carga de trabajo de todas las máquinas. Una simple estimación es sumar los tiempos de procesado de todos los trabajos en cada máquina para llegar al trabajo total realizado por la máquina. Al dividir entre el horizonte de programación se obtiene un porcentaje. Así, si la máquina 1 tiene 34 horas de trabajos para procesar en una semana de 40 horas, su carga de trabajo es (34/40) x 100= 85%. La máquina con el mayor porcentaje de carga de trabajo será, muy probablemente, el cuello de botella.

5.5.2 Programación de la máquina cuello de botella

Denote la máquina cuello de botella por 6,y sea *j{b)*la operación del trabajo /hecho en *b.* Se sabe que el tiempo de procesado del trabajo *i* en la máquina *b* es $p_{ij(h)}$; Sea *p* = $p_{ij(b)}$. También se debe tomar en cuenta lo que ocurre con *i* antes y después de la máquina *b.* Defina el tiempo de liberación del cuello de botella para el trabajo *i, r**, como el tiempo en que el trabajo *i* llega a la máquina *b.* Éste es el tiempo en que se libera el trabajo *i* más el tiempo que tarda en llegar a la máquina cuello de botella; esto incluye el procesado y los tiempos de espera para las operaciones anteriores en las máquinas que están antes. Inicialmente, se supone que no hay esperas, entonces se tiene

$$r_i^b = r_i + \sum_{l=1}^{j(b)-1} p_{il}$$

En la ecuación se pueden incluir estimaciones de los tiempos de espera a partir de datos históricos o de resultados de modelos de colas. También es necesario definir una fecha de entrega del cuello de botella para el trabajo *i, d* , que refleje cuándo debe terminar la operación en el cuello de botella. Para completar el trabajo *i* en su fecha de entrega, debe estar terminado en el cuello de botella un tiempo antes de la fecha de entrega al menos igual a la suma de los tiempos de procesado en las operaciones posteriores. De nuevo, se supone que no hay esperas hacia abajo, matemáticamente se tiene

$$d_i^b = d_i - \sum_{l=j(b)+1}^{m} p_{il}$$

Ahora se programa el cuello de botella como una sola máquina con tiempos de liberación distintos de cero. Éste es un problema *NP-duro*, por lo que se usa un heurístico de despacho (capítulo 8). La regla de prioridad depende de la medida de desempeño para el taller. Carlier (1982) presenta un algoritmo de ramificación y acotamiento rápido que puede usarse si se necesitan soluciones mejores. Sea U el conjunto de trabajo no programados y t el tiempo actual. El procedimiento es

Paso 0. Sea $U = \{1, 2, \ldots, n\}$; $p'_i = p_{ij(b)}$; $i = 1, 2, \ldots, n$, y $t = \text{mín}_{i \in U} r_i^b$.

Paso 1. Sea $S = \{i \mid r_i^b \leq t,\ i \in U\}$ los trabajos disponibles. Se programa el trabajo i^* en b, donde i^* tiene la mejor prioridad entre los trabajos de S.

Paso 2. Sea $U \leftarrow U - \{i^*\}$. Si $U = \varnothing$, se detiene; todos los trabajos están programados. De otra manera, se hace $t = \text{máx}\{\text{mín}_{i \in U} r_i^b,\ t + p'_{i^*}\}$ y se va al paso 1.

Existen varias reglas de prioridad que se pueden usar en este algoritmo. Si la medida es el lapso ($C_{\text{máx}}$), se elige el trabajo disponible al que le falta más trabajo, que es equivalente a TPL. Para el tiempo de flujo, se elige el trabajo al que le falta menos procesado. Para minimizar la tardanza máxima ($7_{\text{máx}}$), se elige el trabajo de cuello de botella con la fecha de entrega más cercana. La prioridad de R&M (capítulo 8) usando la fecha de entrega de cuello de botella y el tiempo de procesado que falta es una buena regla para la tardanza total.

El algoritmo produce un programa de trabajos en la máquina cuello de botella. Éste se debe convertir en un programa para todo el taller.

Hacia adelante y hacia atrás son nombres mal dados en la producción intermitente, porque algunos trabajos pueden usar una máquina antes del cuello de botella y otros la pueden usar después de éste. El tiempo de terminación de un trabajo en el cuello de botella determina el tiempo de llegada para las operaciones posteriores inmediatas al cuello de botella. De manera similar, el tiempo de inicio de un trabajo en el cuello de botella determina la fecha de entrega para la operación precedente inmediata a él. Para un trabajo en una máquina específica, los tiempos de liberación y las fechas de entrega se determinan a partir del programa del cuello de botella. Después se programa cada máquina como un problema de una sola máquina.

Considere una máquina en particular. Si una operación de un trabajo precede al cuello de botella, la meta es terminar la operación antes o en la fecha de entrega para que llegue al cuello de botella antes de su tiempo de inicio programado. Como el trabajo puede tener otras operaciones antes de ésta, la meta es programarlo para que termine tan tarde como sea posible y de todas maneras llegue a tiempo al cuello de botella. Entonces, se intenta terminar en la fecha de entrega. Esto es la programación hacia atrás. Por otro lado, las operaciones después del cuello de botella pueden tener otras operaciones que le siguen, así que se quiere comenzarlas lo más pronto posible para darles tiempo para terminar. Esto es la programación hacia adelante. Para programar la máquina se elige el trabajo con la mejor prioridad. Si su operación en esta máquina está antes del cuello de botella, se programa para que termine lo más tarde posible. Si su operación sigue al cuello de botella, se programa para comenzar lo más pronto posible. Se continúa eligiendo trabajos según su prioridad hasta que todos los trabajos están programados. Después se programan otras máquinas.

Cuando todas las máquinas individuales están programadas, se obtiene una secuencia de trabajos en cada una. Un procedimiento de despacho construye un programa factible para la

producción intermitente. Al no permitir que un trabajo entre al conjunto disponible hasta que sus operaciones anteriores y todos los trabajos que le preceden en la secuencia de la máquina hayan terminado, se vuelve sencillo generar un programa completo.

Si la máquina cuello de botella es un cuello de botella fuerte, en el sentido de que domina al resto, las otras máquinas deben tener suficiente capacidad para realizar los trabajos en el tiempo requerido para satisfacer el programa de cuello de botella. Si no, el programa indicará los tiempos de espera en el taller, que se pueden usar para modificar los tiempos de liberación y las fechas de entrega en el cuello de botella El procedimiento completo se repite hasta que se genera un buen programa para el taller. Se ilustrará el heurístico de cuello de botella con un ejemplo.

Ejemplo 10-8. Programa de cuello de botella para Quick Closures. Considere el problema de Quick Closures del capítulo 8 (ejemplo 8-20). La tabla 10-7 restructura los datos de manera que los tiempos dados de procesado corresponden al par trabajo/máquina, en lugar de a las operaciones. Como se maneja una máquina a la vez, se omitirá el uso del superíndice que denota la máquina en los tiempos de liberación y las fechas de entrega.

Solución. Se suman los tiempos para cada trabajo en cada máquina. Las sumas de los trabajos consisten en la cantidad total de procesado que debe realizarse en ese trabajo. Si no ocurren esperas, el trabajo terminarán en ese tiempo. De la tabla 10-7 se observa que el trabajo 4 toma 34 minutos de procesado; así, el lapso debe ser al menos 34 minutos. De las sumas de la máquina, la 3 debe procesar al menos durante 44 minutos, por lo que 44 es una mejor cota sobre el lapso. La máquina 3 parece ser el cuello de botella. Si ocurren tiempos ociosos en ella, el lapso aumentará. El procedimiento comienza con la suposición de que el lapso es 44.

Con la máquina 3 como cuello de botella, se calculan las fechas de entrega y los tiempos de liberación para el problema de una sola máquina; los tiempos de procesado son los de la máquina 3. La ruta para el trabajo 1 es 1-2-3-4, entonces se procesa en la máquina 3 después de las máquinas 1 y 2. Lo más pronto que puede procesarse el trabajo 1 en la máquina 3 es $p_{11} + p_{12} = 6 + 8 = 14$, y el tiempo de liberación para el trabajo 1 en la máquina 3 será /j = 14. De manera similar, si el trabajo 1 termina para el tiempo 44, su última operación (en la máquina 4) debe terminar en el tiempo 44. Como $P\backslash A$ = 5 minutos, la operación anterior debe terminar para el tiempo 44 - 5 = 39, entonces $d_x = 39$. El trabajo 6 tiene la ruta 3-1 -2-4, por lo que su primera operación se hace en la máquina 3, es decir, su tiempo de liberación es cero. La fecha de entrega del trabajo 6 es la estimación del lapso menos el tiempo de procesado de todas sus operaciones que siguen a la máquina 3; d_6 = 44-2-4-5 = 33. Los datos del resto de los trabajos en la máquina 3 se encuentran en la tabla 10-9.

TABLA 10-7
Quick Closures: tiempos por máquina

	Máquina				
Trabajo	**1**	**2**	**3**	**4**	**Suma**
1	6	8	13	5	32
2	4	1	4	3	12
3	6	8	4	3	21
4	10	5	15	4	34
5	3	4	4	6	17
6	2	4	4	5	15
Suma	31	30	44	26	

TABLA 10-8
Quick Closures: datos de la máquina 3

Trabajo i	1	2	3	4	5	6
r_i	14	5	17	15	13	0
d_i	39	41	44	40	44	33
p_i	13	4	4	15	4	4

TABLA 10-9
Programación de la máquina 3 (cuello de botella)

t	*U*	*[s, c]*
0	**6**	[0, 4]
5	**2**	[5. 9]
13	**5**	[13, 17]
17	**1**, 3, 4	[17, 30]
30	3, **4**	[30, 45]
45	**3**	[45, 49]

Se resuelve el problema de una máquina. Los trabajos disponibles son aquellos con tiempos de liberación tan largos como el tiempo actual. Se programa el trabajo disponible con la fecha de entrega más corta, para comenzar tan pronto como se pueda. Inicialmente, se hace /=0; se tiene r_6 = 0, y el trabajo 6 es el único disponible. Se programa para comenzar en el tiempo 0; como p'_6 = 4, terminará en el tiempo 4. Ahora *í* avanza a 4 y se repite.

Los detalles de la programación de los trabajos restantes se dan en la tabla 10-9. La columna / corresponde al tiempo actual. *U* es el conjunto de trabajos disponibles con el que se programó en negritas, y *[s, c]* contiene los tiempos de inicio y terminación del trabajo programado. El siguiente renglón comienza con *t* igual al tiempo de terminación del trabajo programado anterior. Cuando *t* = 17, se pueden programar los trabajos 1,3 y 4. Se programa el trabajo 1 ya que tiene la fecha de entrega más cercana.

La secuencia de trabajo para la máquina 3 es 6-2-5-1 -4-3 con $C_{váK}$ = 49. El programa se muestra en la figura 10-27. La estimación del lapso para el problema de producción intermitente de Quick Closures, en este caso, es 49.

Ahora se programan las otras máquinas alrededor del programa del cuello de botella, en la máquina 3. Para una máquina en particular, digamos la máquina 1, algunos trabajos tendrán operaciones a procesar antes del cuello de botella y otros después. Los trabajos 1,2,3,4 y 5 tiene operaciones en la máquina 1 anteriores al cuello de botella, mientras que el trabajo 6 se procesa en la máquina 1 después del cuello de botella. Los trabajos con operaciones anteriores a la máquina 1 tendrán tiempos de liberación determinados por el tiempo más cercano que pueden llegar a la máquina 1; éstos se calculan igual que para el cuello de botella. (De nuevo, se supone que no hay esperas excepto el tiempo ocioso programado en el cuello de botella.) Por ejemplo, r_x = 0 para la máquina 1 porque es su primera operación, mientras que es la tercera operación para el trabajo 3, y sigue a las operaciones en las máquinas 4 y 2, entonces $r_3 = p_{3l} + p_{32}$ = 3 + 8 = 11. Las fechas de entrega para una operación que precede al cuello de botella se determinan por el tiempo de inicio del trabajo en el cuello de botella. El trabajo 1 está programado para comenzar en la máquina 3 en el tiempo 17. Para hacerlo, debe estar terminado en la máquina 1 y completar su procesado en la máquina intermedia (2) para el tiempo 17. Su fecha de entrega debe ser d_x = 17 -p_n = 17 - 8 = 11.

Una operación procesada en la máquina 1 después del cuello de botella tiene su tiempo de liberación en esa máquina determinado por su tiempo de terminación en el cuello de botella más cual-

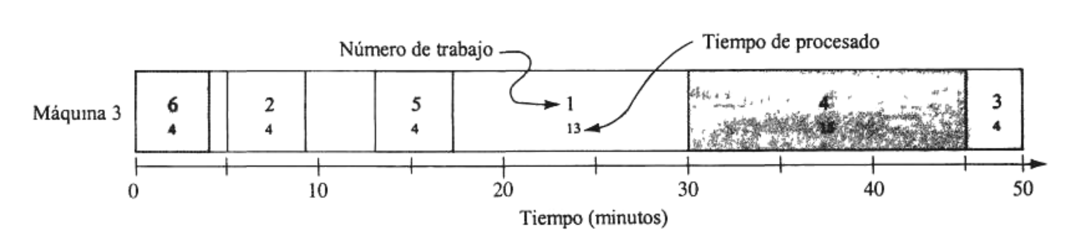


FIGURA 10-27
Gráfica de Gantt para el programa de la máquina 3 (cuello de botella)

TABLA 10-10
Quick Closures: datos de la máquina 1

Trabajo *i*	1^b	2^b	3^b	4^b	5^b	6^f
r_i	0	0	11	5	0	4
d_i	11	4	45	30	3	40
p_i	6	4	6	10	3	2

b = programación hacia atrás
f = programación hacia adelante

TABLA 10-11
Cálculos del programa de la máquina 1

t	*U*	[*s*, *c*]
0	1, 2, **5**	[0, 3]
3	1, **2**	[3, 7]
7	**1**, 4, 6	[7, 13]
13	3, **4**, 6	[20, 30]
13	3, **6**	[13, 15]
15	**3**	[39, 45]

quier otro tiempo que intervenga. El trabajo 6 tiene su primera operación en el cuello de botella, que termina en el tiempo 4. Su segunda operación es en la máquina 1, así que puede llegar ahí en cuanto termina, entonces r_6 = 4. Su fecha de entrega es el lapso estimado menos los tiempos de procesado después de la máquina 1, o d_6 - 49 - p_{63} - p_M = 49 - 4 - 5 = 40. La tabla 10-10 proporciona otros tiempos de liberación y fechas de entrega para la máquina 1.

Para programar la máquina 1, se usa un procedimiento similar al del cuello de botella. De los trabajos que se pueden programar, se elige el que tiene la fecha de entrega más cercana. Se programa hacia atrás cualquier trabajo con una operación en la máquina 1, que viene antes de su operación en la máquina 3 y los otros se programan hacia adelante.

Para programar un trabajo hacia atrás, se programa para que termine lo más tarde posible y a tiempo, ya que puede haber otras operaciones del mismo trabajo que deban hacerse antes. Idealmente debe terminar en su fecha de entrega, pero si no hay periodo ocioso, mientras el tiempo de procesado de la operación termine en su fecha de entrega, el trabajo debe programarse en otra parte. Primero debe intentarse crear suficiente tiempo ocioso comenzando los trabajos programados más pronto sin violar sus tiempos de liberación, o retrasando el inicio de un trabajo ya programado sin violar su fecha de entrega. Si se tiene éxito, se creará un periodo ocioso en el que se puede programar el trabajo actual. Si esto no es posible, se programa de manera que su tardanza sea lo más pequeña posible. La tardanza de un trabajo es el incremento en el lapso, ya que sus fechas de entrega se basan en una estimación del lapso.

TABLA 10-12
Datos para programar las máquinas 2 y 4

Maquina 2						
Trabajo *i*	1^b	2^b	3^b	4^b	5^b	6^f
r_i	6	4	3	0	3	6
d_i	17	9	39	20	7	44
p_i	8	1	8	5	4	4

Máquina 4						
Trabajo *i*	1^f	2^f	3^b	4^f	5^b	6^f
r_i	30	9	0	45	7	10
d_i	49	49	31	49	13	49
p_i	5	3	3	4	6	5

TABLA 10-13
Cálculos de los programas para las máquinas 2 y 4

Máquina 2*			Máquina 4		
t	*U*	[*s*, *c*]	*t*	*U*	[*s*, *c*]
0	**4**	[15, 20]	0	**3**	[29, 31]
3	3, **5**	[3, 7]	7	**5**	[7, 13]
7	1, **2**, 3, 6	[8, 9]	9	**2**	[9, 12]
8	**1**, 3, 6	[13, 21]	12	**6**	[12, 17]
8	**3**, 6	[31, 39]	30	**1**	[31, 36]
8	**6**	[21, 25]	45	**4**	[45, 49]

* Los trabajos 2 y 4 se movieron a [7, 8] y [8, 13] en la máquina 2 para reducir la tardanza del trabajo 1.

Un trabajo programado hacia adelante debe comenzar lo más pronto posible, porque quizá tenga operaciones que le siguen. Si se puede, debe iniciar en su tiempo de liberación. Si no, se retrasa.

Para la máquina 1, los trabajos 1,2 y 5 tienen tiempos de liberación de cero. Como el trabajo 5 tiene la fecha de entrega más cercana, se elige. Debe programarse hacia atrás, denotado por el superíndice *b* en la tabla 10-10, entonces se programa para terminar en su fecha de entrega (tiempo 3) y comienza en el tiempo 0. El tiempo avanza a 3 y el siguiente trabajo que se programa es el 2.

La tabla 10-11 muestra la información del programa para la máquina 1. No se necesita el programa real, sólo la secuencia, que es 5-2-1 -6-4-3. Éste no necesariamente es el orden en que se eligieron los trabajos; más bien *t* se determina por los tiempos de inicio y terminación de cada trabajo.

Debe repetirse este procedimiento para las máquinas 2 y 4. Los datos para estas máquinas se dan en la tabla 10-12.

Las máquinas se programan en la misma forma que la máquina 1. La máquina 2 requiere que los trabajos programados antes se muevan. El trabajo 1 debe programarse para terminar en el tiempo 17, pero el trabajo 4 está en proceso en [15, 20]. No hay 8 (#')unidades de tiempo disponibles para insertar 1 antes que 4. Entonces, los trabajos 2 y 4 se mueven hacia atrás para que el trabajo 1 termine cerca de su fecha de entrega. La tabla 10-13 muestra los cálculos de la programación.

Las secuencias para las máquinas 2 y 4 son 5-2-4-1 -6-3 y 5-2-6-3-1 -4, respectivamente. En este punto, la máquina que determina el lapso se puede designar como el cuello de botella y el procedimiento se repite. Sin embargo, no se hará otra iteración, sino que se programarán los trabajos con base en la secuencia de cada máquina.

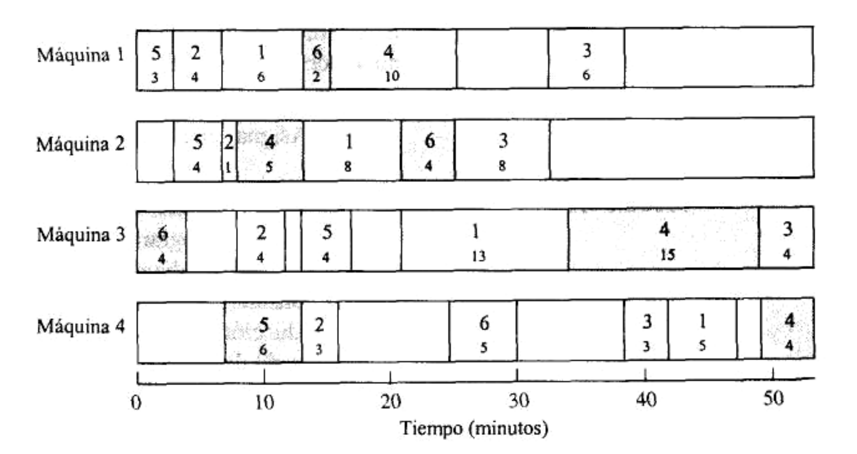


FIGURA 10-28
Gráfica de Gantt para el programa heurístico del cuello de botella

Para obtener la programación del taller, se usa un procedimiento de despacho que mantiene la secuencia de cada trabajo en cada máquina. No es necesario conocer la prioridad, ya que una operación no estará lista para programarse hasta que hayan terminado la operación anterior en otra máquina^ la operación del trabajo precedente inmediato en esa máquina. Por ejemplo, el trabajo 6 tiene su primera operación en la máquina 4, cuya secuencia es 5-2-6-3-1-4, por lo que no podrá comenzar hasta que el trabajo 2 termine en la máquina 4. La granea de Gantt del programa ñnal se presenta en la figura 10-28.

El lapso para este programa es 53, menor que el lapso encontrado en las máquinas 3 y 4. Se puede seleccionar otra máquina como cuello de botella o incluir tiempos de espera en los tiempos de liberación y en las fechas de entrega de la máquina 3 y repetir el procedimiento. La solución parece suficientemente buena, por lo que se detiene el procedimiento. Se pueden mover varias operaciones sin afectar el lapso de producción. El trabajo 6 en la máquina 4 puede iniciar en el tiempo 0 o se puede mover antes que el trabajo 3. Ninguno de estos movimientos reducirá el lapso. Un objetivo secundario (como el tiempo de flujo) puede mejorar con estos movimientos.

La idea del cuello de botella se puede implantar de otras maneras. Para distintas medidas, serán apropiadas otras prioridades. Una implantación más complicada del enfoque de cuello de botella se puede encontrar en Adams *et al* (1988).

5.6 Software

El paquete de software de OPT maneja la programación de cuello de botella. Se pueden realizar aplicaciones sencillas de este enfoque en hojas de cálculo. En la figura 10-29 se muestra un diagrama de flujo de OPT (Meleton, 1986). Los cuatro módulos importantes en los paquetes de OPT son

Módulo de construcción de la red Se usa una base de datos de MRPII para construir una red consolidada para cada producto final. Esta base de datos incluye la lista de materiales, rutas, inventarios, centros de trabajo, requerimientos del mercado y otros datos. La construcción de la red de datos del producto final es el elemento más tardado del OPT.

Módulo servidor El módulo servidor calcula un perfil de carga y la utilización promedio de cada recurso.

Módulo de separación Este módulo divide la red en dos áreas, de recursos críticos y no críticos. Asigna amortiguadores de tiempo en los lugares adecuados.

Módulo OPT OPT es un programador finito hacia adelante (es decir, los cuellos de botella se programan primero) que "toca el tambor" del cuello de botella. Mediante el uso de un buen heurístico (esto es, uno que considere las restricciones) se genera un programa maestro de producción. Éste incluye un informe del programa de trabajo, un perfil de carga para cada cuello de botella (CCR), y un pronóstico de terminación de órdenes.

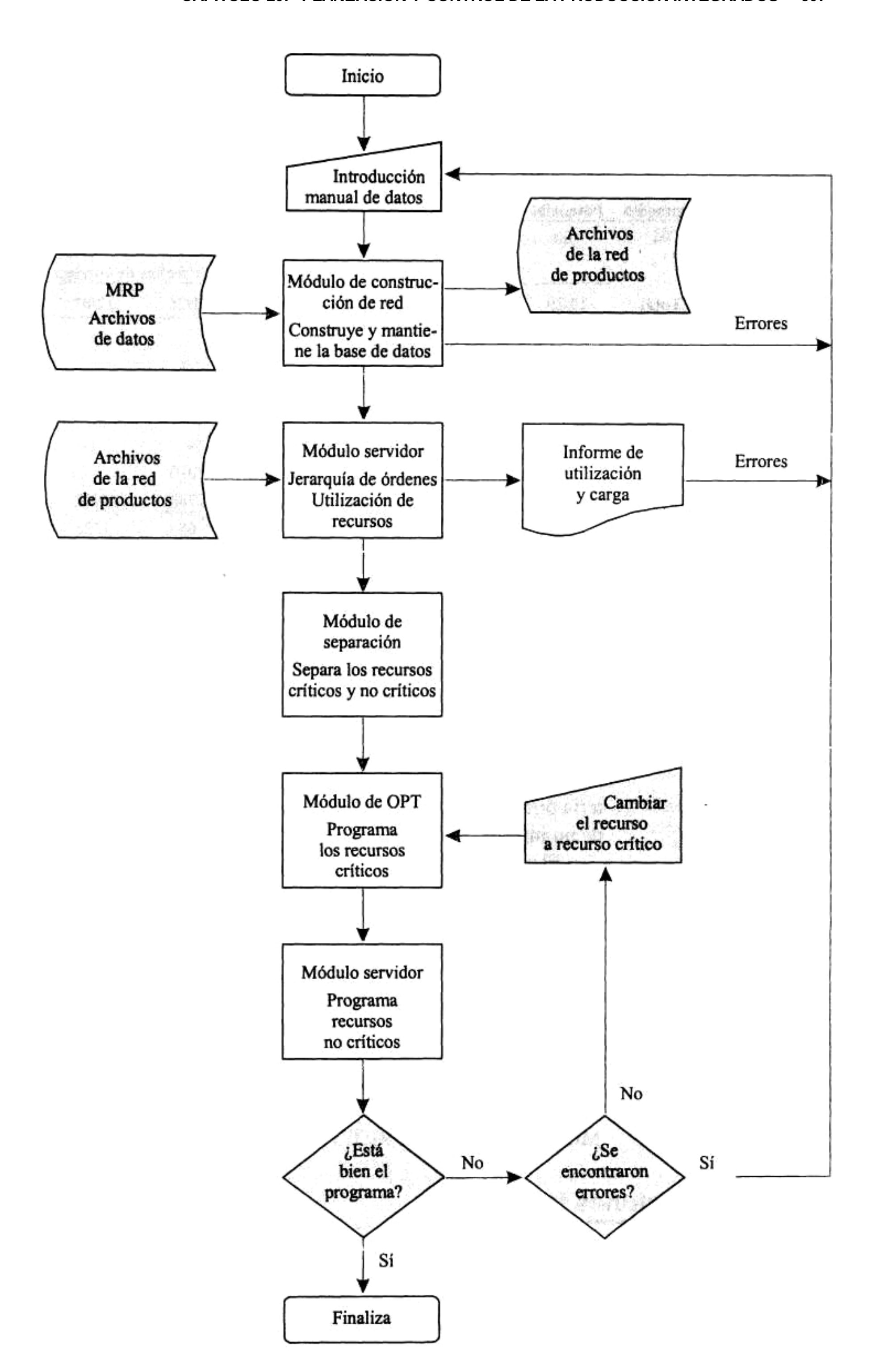


FIGURA 10-29
Diagrama de flujo de OPT (reimpreso de Meleton (1986) con permiso de la American Production and Inventory Control Society, Falls Church, Virginia)

TABLA 10-14
Ejemplo de la salida de OPT

Corrida final del pronóstico trimestral de utilización comenzando 10/01/99 (con tiempo extra)										
Recurso	**Promedio**	**Potencial**	**10/01 sem. 1**	**10/08 sem. 2**	**10/15 sem. 3**	**10/22 sem. 4**	**10/29 sem. 5**	**11/05 sem. 6**	**11/12 sem. 7**	**11/19 sem. 8**
Extrusión	94	100	97	100	100	100	100	100	100	100
		Corrida final de fechas de entrega								
Estación (Hula-Hoop)	**Total**	**10/29**	**11/05**	**11/12**	**11/19**	**11/26**	**12/03**	**12/10**	**12/17**	**12/24**
+41026/BLU	5500	—	—	—	—	—	—	—	—	—
+41026/RED	3000	—	—	—	—	—	—	—	—	—
+41102/GRN	8000	—	—	—	—	—	—	—	—	—
+41130/BLU	5500	1280	1689	—	—	—	—	—	—	—
+41130/RED	3000	790	—	—	—	—	—	—	—	—
+41207/GRN	8000	896	1152	1792	1536	1010	—	—	—	—
+41228/BLU	5500	—	103	768	256	768	1792	1813	—	—
+41228/GRN	8000	—	—	—	—	654	1536	2048	3584	178
+41228/RED	3000	362	512	768	384	640	334	—	—	—

Fuente: Reimpreso de Lundrigan (1986) con permiso de la American Production and Inventory Control Society, Falls Church, Viginia.

Si se examina el diagrama de flujo de OPT, *servidor* debe programar los recursos no críticos, una vez que están programados los críticos. En esta fase, *servidor* opera como un programador infinito que programa hacia atrás, a partir de la demanda maestra de producción. Esto asegura que las operaciones que alimentan a los amortiguadores terminan a tiempo. *Servidor* también establece el ciclo de retroalimentación (cuerda) para que el punto de despacho de materia prima determine la liberación más cercana permitida. La tabla 10-14 contiene el ejemplo de un informe utilización de recursos OPT y un reporte de fechas de envío.

El software OPT también cuenta con habilidades de simulación. Puede simular diferentes escenarios de programación y comparar los resultados según las medidas de desempeño operacionales de la teoría de restricciones (TOC).

El software OPT se vende en cientos de miles de dólares. Todavía más, al menos en el pasado, el software no se vendía, a menos que la compañía estuviera dispuesta a adoptar la filosofía TOC y sus medidas de desempeño. No es de sorprender que sólo las grandes compañías pudieran comprarlo. No obstante, cualquier compañía puede implantar las reglas de OPT y la filosofía TOC.

Hoy en día, el software original OPT no es el único paquete disponible para los sistemas de cuello de botella. Otros paquetes que aseguran la realización de funciones similares a OPT son MOOPI (Berclain) y PRIORITY (Eshbel).

5.7 Aplicaciones industriales

Comparada con el MRPII y JIT, la programación de cuello de botella es un enfoque relativamente nuevo, todavía hay pocos casos de implantación bien documentados en la literatura. Johnson (1986) informe sobre una implantación en General Electric; Fogarty (1991) resume

dos aplicaciones, una en General Motors y otra en AT&T, y Beckett y Dang (1992) describen un implantación en Pratt & Whitney Canadá.

General Electric implantó OPT en 20 plantas. Los resultados en su Aircraft Engine Business Group en Wilmington, Carolina del Norte indican que sus ciclos de producción son 40% más cortos que en instalaciones similares. Más aún, el inventario se redujo $30 millones en un año.

La planta de corte de General Motors en Windsor, Ontario implantó *"manufactura sincrónica"* que es un híbrido del concepto TOC/JIT. La implantación comenzó en 1986. Para 1988, la planta había logrado cerca de 50 rotaciones de inventario por año —hacía 17 cuando inició—. El tiempo de entrega se redujo 94%, el costo anual disminuyó 23 millones de dólares y la producción aumentó alrededor de 17%.

De estos resultados (Fogarty, 1991) se obtiene una idea general interesante de la mecánica de TOC. Mientras el tiempo de entrega se redujo 94%, el inventario sólo disminuyó 68%. Casi siempre, al implantar JIT por primera vez, esos porcentajes son similares. La razón de la diferencia es que en TOC el lote transferido es distinto del procesado (sección 5.4), y en JIT son iguales.

La planta de la división de microelectrónica de AT&T en Reading, Pensilvania implantó lo que se llama *"manufactura de sentido común"*. Este enfoque parece también ser una fusión de los conceptos TOC y JIT. Se reporta una reducción de 50% en inventario y 70% en el tiempo de entrega, y la rotación del inventario se quintuplicó, pero el retrabajo aumentó 60%. En total, la planta estaba muy satisfecha con estos resultados.

Pratt & Whitney Canadá informa resultados de corto plazo de lo que llamó "manufactura sincrónica", también una combinación de las filosofías TOC y JIT. Su meta establecida es un cambio de cultura organizacional. Los objetivos específicos son disminuir en 50% el tiempo de entrega y el inventario y, a la vez, aumentar 100% las entregas a tiempo. Entre septiembre de 1990 y junio de 1991, las entregas a tiempo había aumentado 50% y el inventario y los tiempos de entrega habían disminuido 25 y 38%, respectivamente. Junto con la aplicación de las técnicas de manufactura sincrónica, P&W informa sobre un programa masivo de educación para eliminar una cultura de ineficiencia e instituir una cultura de satisfacción del cliente.

La implantación de TOC/OPT tiene también su lado negativo. Un ejemplo es un fabricante de semiconductores que usa la teoría de restricciones para administrar su flujo de producción. Por un lado, los trabajadores y supervisores odiaban la idea de tener una etiqueta de cuello de botella, los ingenieros sentían lo contrario. La etiqueta era la única manera de lograr que la administración apoyara sus proyectos y sus experimentos. El resultado fue un ambiente de manufactura poco deseable.

5.8 Epílogo

Desde su concepción, OPT/TOC ha sido un tema controvertido. Aunque la controversia ha disminuido últimamente, las diferencias de opinión son todavía grandes. Algunos consideran que es el salvador de la manufactura en Estados Unidos. Otros reconocen su visión pero aducen que "estos logros son admirables para un sistema desarrollado al final de la década de los 70 por un físico que todavía no ha producido su primera historia de éxito no calificado" (Baudin, 1990). Igual que en otros casos de esta naturaleza, se piensa que la verdad está en algún punto intermedio.

La razón de la controversia puede ser la forma en que se introdujo OPT/TOC. Desde el principio, el OPT se desarrolló como un producto para la venta, en contraste con el MRP II y JIT, cuyo origen fue su uso en una fábrica. Al no revelar cómo funciona el "algoritmo secreto" de OPT, su diseñador lo condenó a quedar sumergido en el misterio. La mercadotecnia tan agresiva de Goldratt llegó casi al nivel del celo de un misionero. Este enfoque puso furiosos a unos y convirtió a otros. "En un mercado nuevo, relativamente inocente como el de los sistemas de control de la producción, un poco de misterio y muchas promesas llegan muy lejos (Blinksy, 1983). Entonces, tal vez los dueños de OPT y TOC practicaron lo que predicaban: ¡explotaron la restricción del mercado!

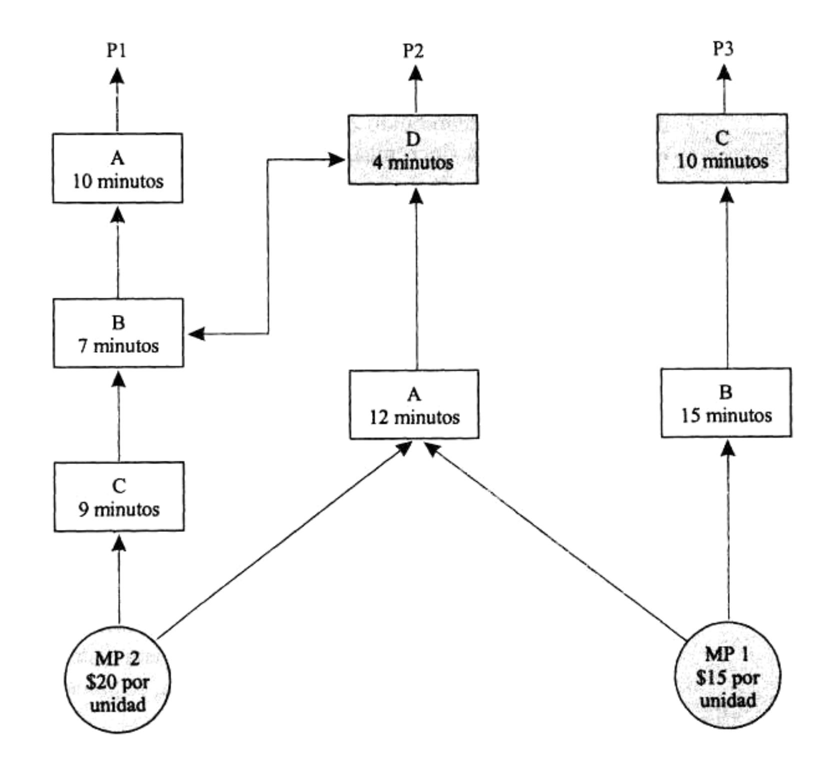
En un último análisis, estos argumentos no son importantes. La pregunta crucial es si el OPT/TOC hace una contribución al control de la producción y al pensamiento de la fabricación. En un principio, OPT/TOC no identificaba los cuellos de botella, pero OPT centra la atención en ellos y desarrolla métodos para explotarlos. De una simple herramienta de programación, OPT desarrolló una filosofía completa de producción. OPT/TOC está dejando su huella en la industria y con esto comparte el escenario con MRP II y JIT. ¿Son diferentes? Esto se analizará en la sección 7.

SECCIÓN 5 EJERCICIOS

10.56. ¿Cuáles son las tres categorías de restricciones?

10.57. ¿Qué medidas de desempeño se usan para evaluar las mejoras de un sistema?

10.58. Considere el siguiente sistema de producción:



También se cuenta con los siguientes datos:

Producto	Demanda semanal	Precio (dólares por unidad)
Pl	120	50
P2	150	100
P2	100	90

La disponibilidad de recursos es la siguiente:

Recurso	Disponibilidad (minutos por semana)
A	**1000**
B	**2000**
C	**1000**
D	**1500**

a) ¿Es posible cumplir con la demanda? ¿Cuál es la restricción del sistema?
b) Establezca el problema como un problema de PL. ¿Cuál es la mezcla óptima de productos con las restricciones de capacidad actuales?
c) Suponiendo que no hay restricciones de capacidad, ¿cuál es la restricción del sistema?
d) ¿Cuánto dinero pierde la compañía como resultado de la imposibilidad de cumplir con la de manda?
é) ¿Cuál es la restricción del sistema y la mezcla de productos óptima, suponiendo que la materia prima 2 (MP 2) no se puede comprar en cantidades mayores que 250?

10.59. ¿Qué impulsa la liberación de órdenes a producción en un sistema controlado por la técnica de tambor-amortiguador-cuerda (TAC)?
10.60. Una suposición importante del método TAC es que la localización del cuello de botella es fija (es estático, no dinámico). ¿Cuáles son las causas posibles de un cuello de botella dinámico? ¿Se pue de aplicar el método TAC a esta situación? Explique por qué.
10.61. Es común que el amortiguador de tiempo en un sistema controlado por TAC se establezca en 1/4 del tiempo de entrega total. Describa las distintas consideraciones que llevan a establecer un tiem po mayor o menor que este valor inicial.
10.62. ¿Cuál es la diferencia entre los requerimientos de datos para MRP y para sistemas cuyo control se basa en el cuello de botella? ¿Por qué?
10.63. Considere las tres siguientes configuraciones de una línea de manufactura en serie:

- Sin amortiguadores entre estaciones de trabajo
- Con amortiguadores limitados entre estaciones de trabajo
- Con amortiguadores ilimitados entre estaciones de trabajo

Describa los efectos de bloqueo y hambre, y el impacto que tienen en la salida de producción y el tiempo de flujo.

10.64. Considere un proceso de producción que consiste en tres operaciones en secuencia, donde cada una toma un minuto por unidad de tiempo. Por razones tecnológicas, el lote del proceso es 10 uni dades. Para diferentes valores del lote de transferencia, entre 1 y 10 unidades, calcule el tiempo de entrega que resulta. Dibuje una gráfica de la relación contra el tiempo de entrega calculado. ¿Cuál es su conclusión?
10.65. Compare los datos que se necesitan para operar un sistema MRP II y un control OPT. ¿Cuál es su conclusión?
10.66. ¿Cuál es la diferencia entre OPT y TOC?

10.67 All Wood es un taller de producción por pedido que fabrica varios estilos de gabinetes para cocina. Como lo indica su nombre, sus productos son completamente de madera. Existen órdenes pendientes de 5 estilos, que se designan como 1,2,3,4 y 5. Todos los gabinetes pasan por tres departamentos en el mismo orden: cortado (C), ensamble (E) y acabados (A). Los tiempos de procesado para cada estilo se dan en la tabla que sigue. Tan pronto están listos todos, se colocan en un camión y se envían al cliente. Programe el taller de manera que el camión se pueda ir lo más pronto posible.

	Tiempos de procesado (horas)		
Estilo	**C**	**E**	**A**
1	**3**	**12**	**6**
2	**10**	**21**	**9**
3	**6**	**12**	**1**
4	**4**	**18**	**13**
5	**6**	**5**	**8**

10.68. Woody Doer, el superintendente en All Wood, asegura que debe tomarse en cuenta a los clientes al hacer la programación. La orden del estilo 1 es del mejor cliente de All Wood y quiere tener sus gabinetes a más tardar dentro de una semana. Los estilos 2 y 3 son para clientes que ocasionalmen te hacen pedidos pequeños y quieren sus gabinetes dentro de 10 días. El estilo 4 es para un cliente nuevo, un contratista grande que puede ser un buen cliente potencial; él quiere sus gabinetes lo más pronto posible. El estilo 5 es un pedido de un contratista local que coloca órdenes pequeñas todos los meses y necesita sus gabinetes en seis días. ¿Qué programa recomendaría ahora a AllWood?

10.69. Un taller de producción intermitente tiene pedidos para los trabajos 1,2, 3 y 4. Cada trabajo pasa por las mismas tres máquinas, A, B y C. Los tiempos de procesado y las rutas se dan en la siguien te tabla. Programe la producción para que todos los trabajos terminen lo más pronto posible.

	Tiempos de procesado (min)			**Ruta de operación**		
Trabajo	**A**	**B**	**C**	**1**	**2**	**3**
1	**3**	**5**	**6**	**A**	**B**	**C**
2	**2**	**2**	**4**	**C**	**B**	**A**
3	**1**	**8**	**2**	**B**	**A**	**C**
4	**8**	**7**	**2**	**B**	**C**	**A**

10.70. Suponga que los cuatro trabajos del 10.69 son muy costosos. ¿Qué programa recomendaría? Establezca todas las suposiciones que haga.

6 SISTEMAS HÍBRIDOS JALAR-EMPUJAR

Como se observó, los sistemas de control de la producción jalar o empujar "puros" tienen varias desventajas. Aun cuando la arquitectura de control de la producción sea adecuada para cierto entorno de manufactura, siguen existiendo debilidades. Un sistema de control basado en CONWIP, que en realidad es un híbrido de jalar y empujar (jalar en la primera estación y em-

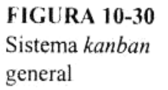
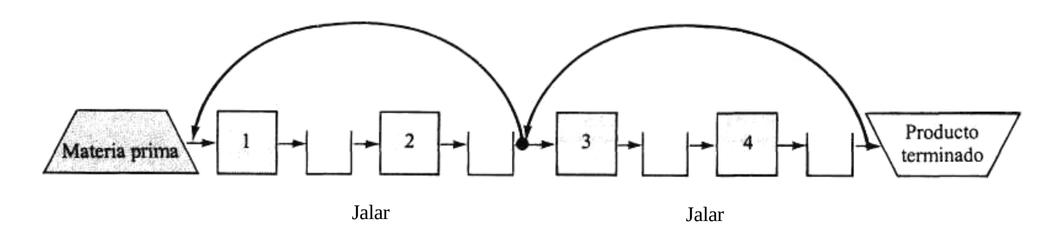


FIGURA 10-30 Sistema *kanban* general



pujar de ahí en adelante), también tiene desventajas; CONWIP usa una sola tarjeta o contenedor para distintas partes. Por lo tanto, el inventario de "seguridad" es relativamente bajo y no garantiza una respuesta rápida para las demandas de los clientes. Por un lado, la necesidad de tiempos de preparación cortos es menos significativa para CONWIP que para jalar puro, lo que hace que sea más general; por otro lado, debe preservarse un flujo uniforme si se quiere mantener el nivel de servicio en un nivel razonable (debido al inventario de seguridad relativamente bajo). Los tiempos de preparación deben mantenerse suficientemente cortos para permitir un flujo continuo. Respecto a la optimización del sistema CONWIP, es importante observar que el trabajo en proceso sólo puede cambiarse y controlarse en contenedores. El tamaño del contenedor es el elemento más pequeño que se puede controlar. El OPT también es un sistema híbrido: jalar antes del cuello de botella y después empujar. En un entorno de modelo mixto el cuello de botella puede cambiar de una estación de trabajo a otra y es difícil manejar cuellos de botella con OPT. Asimismo, OPT necesita datos muy exactos del cuello de botella.

Se desarrollaron varios modelos para mejorar el desempeño de los sistemas puros jalar y empujar y para manejar los problemas en modelos híbridos como CONWIP. Uno de estos modelos se conoce como ***kanban* general** y fue propuesto por Tayur (1992). En principio, el *kanban general* es una serie de segmentos controlados por CONWIP y enlazados en serie. El trabajo se jala entre cada segmento y se empuja dentro del segmento. Cada segmento opera como una línea CONWIP normal. En la figura 10-30 se ilustra la topología del sistema de control de producción.

El sistema *kanban general* también se puede ver como una serie de células de manufactura enlazadas. Cada célula consiste en una o más máquinas. Si el sistema de manufactura completo tiene una sola célula, la arquitectura que resulta es CONWIP. Si todas las células tienen sólo una máquina, la arquitectura corresponde al *kanban* empujar tradicional.

En un sistema con control *kanban* se tienen amortiguadores antes de cada cuello de botella en forma de tarjetas *kanban.* En realidad, los amortiguadores son necesarios sólo antes de los cuellos de botella, así, un sistema controlado por *kanban* opera con un nivel de trabajo en proceso más alto del necesario. Un sistema controlado por CONWIP los controladores se acumulan frente al cuello de botella y un sistema de este tipo puede obtener la misma producción que un sistema *kanban,* pero con un nivel menor de trabajo en proceso. Cuando el sistema es estocástico, esta distinción entre CONWIP y *kanban* introduce un problema: los cambios del cuello de botella pueden causar hambre, ya que toma tiempo acumular el trabajo en proceso antes del nuevo cuello de botella. Por lo tanto, en un escenario de este tipo, CONWIP necesita más trabajo en proceso para compensar los cambios de cuellos de botella. El *kanban general* tiene mejor desempeño en estas situaciones, como lo muestran las simulaciones. El trabajo teórico de Tayur (1992) es nada más para un producto y, por lo tanto, el aspecto de contenedores o tarjetas específicas para números de parte es irrelevante. El *kanban general* y sus características está todavía sujeto a investigación continua, como la desarrollada por Hodgson y Wang (1991) y ChangyYih(1994).

7 COMPARACIÓN

7.1 Empujar, jalar y cuellos de botella

La comparación de los tres enfoques puede ser muy compleja. Para evitar eso, esta sección se estructura como sigue: primero se resume cada enfoque, después se hace una comparación por pares y, por último, se comparan los tres. Recuerde que todos comienzan con una componente técnica y desarrollan una filosofía administrativa para toda la organización.

Los **sistemas empujar** comenzaron como una técnica de planeación de requerimientos y se convirtieron en sistemas de administración y planeación de operaciones y su ejecución. Un sistema empujar genera un MPS, "explota" el producto final en sus partes, ordena su liberación a la planta y verifica y ajusta el inventario.

El MRPII es un concepto de planeación centralizada, con una amplia base de datos como apoyo. MRP II es una poderosa herramienta para planear la producción y los materiales. Su base de datos la convierte en una buena herramienta para la integración funcional y la administración de datos. Su modo de planeación es tal vez el más adecuado para manejar entornos dinámicos, como la producción intermitente.

El MRP II tiene tres debilidades notorias: supone una capacidad infinita; requiere datos relativamente exactos y completos de todos los eventos en la planta, y supone tiempos de entrega fijos, lo que lo hace débil. Para mitigar la suposición de capacidad infinita, el MRP II usa un módulo de planeación preliminar de la capacidad. Esto es, en definitiva, una aproximación y pocas veces proporciona una buena solución. La idea de capacidad infinita experimenta un resurgimiento en la investigación, por lo que deben esperarse nuevos desarrollos en esta área en los próximos años.

El tiempo de entrega fijo es una limitación importante de los sistemas empujar. Los tiempos de entrega varían según el grado de carga de la planta. La falacia de MRP II es que sus liberaciones producen las mismas condiciones que determinan los tiempos de entrega, pero estos tiempos de entrega se toman como conocidos y fijos al hacer las liberaciones (Karmarkar, 1989). Además, tanto los tiempos de manufactura como los de entrega de abastecimiento fluctúan en la práctica. Un tiempo de entrega fijo se establece suficientemente alto para cubrir todas las contingencias y dará como resultado inventarios excesivos.

Existen remedios para esta debilidad en los tiempos de entrega del MRP II. El más drástico es "lista negra" que contiene las partes que están atrasadas o a punto de atrasarse. Las listas negras son métodos informales y por lo tanto no está bien documentados. Algunos métodos más formales son el de liberación de órdenes (X-Flo), técnicas de programación (Class, MIMI) o simulación (Factor). Un enfoque más riguroso es el de los sistemas híbridos, que se analizarán más adelante.

Los **sistemas jalar** comenzaron como una técnica de control de la producción, *kanban*, y se convirtieron en una filosofía de administración, JIT. Los principios que rigen son la administración del tiempo de entrega y la eliminación de desperdicio en todas las etapas de la manufactura. La fuerza que impulsa al JIT es la entrega a tiempo del material a cualquier proceso de transformación.

Las ventajas principales de los sistemas jalar son tiempos de entrega más cortos, que añaden flexibilidad a la línea de producción para responder a cambios en la demanda; reducción de inventario y eliminación de otros tipos de desperdicio (de material y retrabajo, utilización,

etc.), y las consideraciones de capacidad inmersas en las operaciones de programación de los sistemas jalar en dos sentidos. £1 sistema *kanban* es una forma poco costosa de implantar los sistemas jalar. £1 hecho de que puedan o no usar la computadora, hace posible implantarlos en organizaciones pequeñas.

Los sistemas jalar sufren de tres desventajas importantes:

- Son sistemas miopes. No reconocen los eventos futuros y por lo tanto no planean bien.
- Los sistemas jalar son reactivos. No operan bien en casos con grandes variaciones; es de cir, requieren un flujo de producción uniforme para que la implantación sea exitosa.
- Los sistemas jalar no pueden realizar el seguimiento de los lotes (esto es, no pueden anclar los lotes a los clientes específicos).

De cualquier forma, las técnicas y la filosofía de los sistemas jalar tienen un lugar establecido en las industrias occidentales.

Los sistemas **de cuello de botella** son relativamente nuevos en el campo de los sistemas de producción integrada. Comenzaron como programadores del cuello de botella (OPT) y evolucionaron en una filosofía de administración más amplia (TOC). La fuerza detrás de ambos, OPT y TOC, es la explotación de las restricciones. La mayor contribución de TOC es que se concentra en las restricciones y promueve el concepto de efectividad contra eficiencia (es decir, la baja utilización de la máquina o el tiempo ocioso de la mano de obra no necesariamente son un mal). Ninguna de estas ideas es nueva, pero OPT/TOC resalta las herramientas para implantarlas.

Las mayores desventajas de los sistemas de cuello de botella son el manejo de la capacidad finita, que permite la separación de lotes y requiere la integridad de los datos sólo para los cuellos de botella. Es concluyente que el OPT es un programador para la planta muy poderoso.

Los sistemas de cuello de botella también tienen fallas. Son sensibles a varios parámetros, como el número de recursos del cuello de botella, el número total de centros de trabajo y la complejidad dé la estructura del producto. El OPT es útil en particular en la manufactura no repetitiva como los talleres de producción intermitente. Su desempeño disminuye mucho en situaciones de cuellos de botella dinámicos. Cuando el cuello de botella cambia de una máquina a otra, se conoce como dinámico. Su causa son los cambios en la mezcla de productos o las variaciones estocásticas. Una investigación de campo sobre los usuarios de OPT (Fry *et al.*, 1992) identifica cinco debilidades primordiales en los paquetes de software.

No son amigables
Requieren una retroalimentación a tiempo y una exactitud extrema
- Son demasiado sofisticados
- El costo de mantenimiento es prohibitivo
- Los resultados no son intuitivos

La implantación completa de OPT/TOC requiere cambios importantes en la organización, que la hacen tanto costoso como difícil. Todavía más, algunas medidas operacionales sugeridas por TOC todavía causan controversia y esto inhibe su implantación.

Existe una diferencia básica entre los sistemas *empujar y jalar*. Los primeros inician la producción anticipándose a la demanda futura, mientras que los segundos inician la producción como reacción a la demanda actual (Karmarkar, 1989). Los sistemas empujar son mejores para la planeación y los sistemas j alar los son para las actividades en la planta de producción.

Sin embargo, los sistemas jalar y empujar no son mutuamente excluyentes y no necesariamente tiene conflictos entre sí. La línea que los divide no es tan marcada como algunos pretenden. Más aún, coexisten en los sistemas híbridos construidos sobre sus puntos fuertes. Sin duda muchas compañías de manufactura avanzada practican este enfoque híbrido. Usan *kanban* o un sistema similar junto con un "caballito de batalla" de empujar probado como MRPII.

Los *sistemas híbridos* tienen una implantación diferente según la situación. Por ejemplo, en un entorno de fabricación con flujo uniforme, MRP II realiza la planeación de materiales y los métodos jalar controlan la planta. En la manufactura repetitiva por lotes con tiempos de entrega más o menos estables, la liberación de órdenes puede hacerla MRP II ojalar, pero MRP II debe realizar la planeación de materiales. Por último, en un entorno dinámico, como la producción intermitente, MRP II es invaluable para la planeación y, por ser el mejor, para la liberación de órdenes; el laberinto de flujo de materiales es demasiado complejo para jalar. Estos sistemas híbridos han recibido nombres como *JIT-MRP,* **MRP sincro, y MRP II basado en tasas,** entre otros.

Los **sistemas empujar y** los de **cuello de botella** parecen tener cosas en común. De hecho, OPT se desarrolló para sustituir MRP n. Ambos tienen fortalezas y debilidades, pero sobresale un hecho: existen muchos más usuarios de MRP II que de OPT. Esto es obvio debido a que hay alrededor de 200 compañías de software que venden MRP II y sus derivados, y sólo hay unas cuántas que ofrecen el software de cuello de botella.

OPT usa casi los mismos datos que requiere MRP II, pero los procesa en forma diferente. Entonces, una organización que usa MRP II de ciclo cerrado ya cuenta con los datos básicos para OPT y con la comprensión de la retroalimentación. El requisito de integridad de los datos para estos sistemas es distinto. La afirmación de que OPT necesita menos exactitud en los datos que MRP II debe tomarse con recelo. OPT necesita menos exactitud en los centros no cuello de botella, pero requiere mayor exactitud en los datos para el cuello de botella.

MRP II es transparente al usuario. En el caso de OPT, el usuario no siempre lo entiende, todavía tiene el síndrome de la caja negra, aunque poco a poco desaparece. En MRP II, la liberación de órdenes es el tambor, el OPT puede colocar el tambor donde quiera. Dado que OPT toma en cuenta la capacidad finita, produce programas más cercanos a la realidad que MRP II.

Existe similitud entre los dos enfoques, respecto a los requerimientos de datos para el producto y el proceso y al compromiso administrativo. Por lo tanto, ambos requieren un esfuerzo considerable para la implantación, capacitación específica, educación e instrucción. Por último, los sistemas empujar utilizan una filosofía de planeación centralizada, mientras que los de cuello de botella se centran en la explotación de las restricciones.

Los *sistemas jalar y cuello de botella* tienen varias características comunes. Ambos son programadores de capacidad finita y ambos han vencido el problema de tamaño de lote de MRP II. Sus requisitos de integridad en los datos son menores, considerando que la necesidad de JIT de exactitud es casi nula. Ambos enfoques promueven la reducción de preparaciones; OPT exige esta reducción sólo para el cuello de botella, JIT la requiere para todos los centros de trabajo. Ambos sistemas comparten la filosofía de efectividad a su manera. JIT se enfoca en la eliminación del desperdicio mientras que TOC resalta la explotación de las restricciones.

OPT no sufre la miopía en la planeación de JIT. Por otra parte, la implantación de JIT no necesariamente requiere computadoras. Los sistemas jalar con frecuencia requieren la reorganización de la planta, los de cuellos de botella no. Por último, los sistemas jalar generan la programación más rápido que OPT, pero OPT proporciona un programa más completo.

Los sistemas *empujar Jalar* y *cuello de botella* comparten varias características. De una manera u otra, todos requieren un cambio en la cultura organizacional con un esfuerzo bastante grande en educación y capacitación. Todos necesitan un compromiso de la administración para el cambio en los procesos. Ninguna de sus componentes técnicas es la mejor para todos los entornos de producción en todos los problemas.

Para comprender mejor esta última afirmación, en la tabla 10-15 se hace la comparación de los tres enfoques respecto a la función de PCP y al sistema de manufactura. Cada elemento de la tabla contiene lo que los autores piensan que es el mejor enfoque. Si no hay un ganador evidente se dan dos enfoques. Al examinar la tabla, sobresale una conclusión: Para *todas* las funciones en *todos* los entornos, el mejor enfoque es el híbrido. Sin embargo, como no existe un producto comercial, es más difícil implantarlo.

7.2 Hacia el futuro

Los sistemas de producción integrados se encuentran siempre en el estado de cambio tecnológico. Las herramientas de administración de la manufactura que los apoyan también debe seguir cambiando. Así, no se cree que exista un arreglo rápido para los sistemas de producción integrados. No hay una panacea; no existe un método que se ajuste a todos los entornos de manufactura. Entonces, ¿hacia dónde nos dirigimos? Los autores piensan que hay tres tendencias asociadas con tres participantes distintos: quienes desarrollan los sistemas, los usuarios de los sistemas y las organizaciones que los adoptan.

Quienes desarrollan los sistemas harán un esfuerzo para vencer las fallas de cada sistema. Un enfoque, ya en desarrollo, emplea un sistema híbrido. Otro involucra el mejoramiento de mismo sistema. Así, se vislumbra el inicio de un software MRPII con una programador de capacidad finita y una suposición relajada de los tiempos de entrega fijos. Un producto de este tipo es un software llamado *Ashbel.* Los sistemas de cuello de botella también tienen un nuevo producto llamado *Disaster* que supuestamente resuelve el aspecto de cuellos de botella dinámicos. En definitiva se necesita más investigación para mejorar estos sistemas.

Por *usuarios del sistema* se entiende aquellos profesionales dentro de la organización que usarán y darán servicio al sistema. Este grupo contribuye en el proceso de selección del sistema. Conforme los usuarios conozcan más, habrá un mayor entendimiento de la naturaleza de

TABLA 10-15
Aplicaciones funcionales de los sistemas de PCP integrados

		Función de PCP integrada			
Variación de tiempo de flujo	**Tipo de sistema**	**MPS**	**Planeación de materiales**	**Liberación de órdenes**	**Planta**
Bajo	Producción continua	MRP II	MRP II	JIT	JIT
	Producción por flujo	MRP II	MRP II	MRP II o JIT	JIT
	Producción intermitente	MRP II	MRP II	MRP II	OPT
Alto	Producción por pedido	MRP II u OPT	MRP II u OPT	OPT	OPT

Fuente: Adaptado de Karmarkar (1989), reimpreso con permiso de Harvard Business Review.

los sistemas de PCP integrados, en particular, comprenderán cjue no hay una talla para todos. El resultado será un proceso de selección más cuidadoso qué ajuste las habilidades de la herramienta a la necesidad y al entono.

Para la *organización que adopta el sistema,* la selección de cierto enfoque debe ser acorde con la filosofía de administración. Se piensa que para muchas organizaciones que están llevando a cabo un cambio cultural (TQM, "reingeniería", *kaizen,* etc.) sería más sencillo adaptarse a las filosofías administrativas de cada sistema de planeación y control de la producción integrado. De hecho, esta tendencia tal vez haga que las tres filosofías se acerquen. Sin duda, ya no es como "comer dulces". El *Wall Street Journal* (Naj, 1996) informó sobre la nueva moda en el desarrollo de software: la velocidad. Se trata de un software basado en simulación que emula la cadena de abastecimiento con detalle, tomando en cuenta muchos aspectos estudiados: MRP, inventarios, programación de cuellos de botella, capacidad finita, tiempo de respuesta rápida, etcétera. Estos sistemas de software pueden mostrar casi al instante si una orden se puede entregar a tiempo. Si la respuesta es no, el software dirá qué cambios se deben hacer para que la entrega sea posible. Parece ser el principio de la siguiente era en el software de manufactura, la que va más allá de MRP II y ERP.

SECCIÓN 7 EJERCICIOS

10.71. ¿Cuáles son las diferencias más importantes entre los sistemas empujar y jalar?

10.72. ¿Cuáles son las desventajas de los sistemas jalar, empujatf y cuello de botella?

10.73. Puede usarse un enfoque de JIT jalar para la planeación de materiales? ¿Por qué?

10.74. Analice por qué el control JIT es adecuado para el entorno de producción por pedido.

10.75. ¿Pueden usarse las mismas medidas de desempeño para compara los sistemas empujar y jalar? ¿Por qué?

10.76. Compare los requerimientos de datos de MRP II, OPT y *kanban* que son necesarios para controlar un sistema de manufactura (tiempos de procesado, lista de materiales, demanda, etcétera). ¿Cuál es su conclusión?

10.77. ¿Cuál es la diferencia entre el enfoque tambor-amortiguador-cuerda y CONWIP?

10.78. Existen dos maneras alternativas de liberar las órdenes para producción:

á) Tasa de liberación igual a la capacidad disponible.
b) Tasa de liberación igual a la tasa con que los productos terminados dejan el sistema.

¿Hay alguna diferencia entre estas alternativas? Describa el efecto de estas políticas de liberación sobre el trabajo en proceso.

8 EVOLUCIÓN

Los tres métodos de planeación y control de la producción integrados evolucionaron siguiendo trayectorias diferentes. Se estudiará cada una por su lado y después se hará un análisis combinado.

El origen de los sistemasyVz/ar se remonta a principios de la década de 1970, con las primeras publicaciones de los libros de planeación de requerimientos de materiales. Al primer libro de Plossl y Wight (1971) le siguió el de New (1974). El libro de Orlicky (1975) es quizá el trabajo más conocido sobre MRP. Hasta ese momento la industria usaba los sistemas de punto de reorden (ROP), aunque no son adecuados para sistemas de demanda dependiente. La necesi-

dad de manejar demandas dependientes existía, y el surgimiento de la computadora hizo posible satisfacerla. Se piensa que la primera aplicación de MRP computerizado ocurrió alrededor de 1970.

La ampliación de MRP para que incluyera otras componentes del sistema de producción fue natural. El MRP ya no era adecuado para describir el nuevo sistema; tal vez fue Wight (1984a, b) el primero en proponer MRP II. Este nombre representa un mayor alcance de la pla-neación y supervisión de los recursos en una organización de manufactura, que incluye manufactura, finanzas, mercadotecnia e ingeniería.

Lo normal es que se atribuya el inicio de los sistemas jalar a Toyota a principios de los 70. Sin embargo, se cree que sus raíces se remontan a la era de Henry Ford. Ford (1924) afirmó

> Hemos encontrado en la compra de materiales que no vale la pena comprar más que las necesidades inmediatas. . . Si el transporte fuera perfecto y se pudiera asegurar un flujo de materiales parejo, no sería necesario mantener inventarios de ninguna clase.

Toyota comenzó a experimentar con las ideas de *jalar* a principios de los 50, y lo había implantado en toda la compañía al llegar los 70. Dos personas son responsables de JIT dentro de tb-yota, Ohno (1982) y Shingo (1981). En el inicio, este enfoque estaba confinado a la Toyota Company. Después de la crisis del petróleo de 1973, muchas compañías japonesas tenían problemas económicos mientras que Toyota seguía estable. Esto motivó a otras compañías a copiar el sistema de Toyota, y se diseminó en todo Japón. Otras compañías retinaron tanto la componente técnica como la filosofía administrativa de JIT. A finales de los 70, los elementos de JIT comenzaron a emigrar a otras partes del mundo. Por el bajo desempeño económico de muchas compañías occidentales y los buenos resultados de JIT en Japón, los sistemas jalar tuvieron una amplia aceptación. Algunos de los primeros en adoptarlos en Estados Unidos fueron Harley Davidson, Goodyear y General Electric. Hoy en día los conceptos de jalar son parte de la cultura corporativa de muchas compañías americanas y europeas.

Los primeros experimentos con la programación de *cuellos de botella* comenzaron en Israel a mediados de los 70. OPT ganó un lugar en el mercado estadounidense en 1979. Al darse cuenta de que la programación de una planta computarizada es sólo un aspecto del problema más grande de manejar con éxito una organización de manufactura, Goldratt desarrolló una filosofía administrativa, TOC, a principios de los 80. Ésta se extendió gradualmente a todo el mundo.

OPT/TOC no tuvo un camino sencillo para captar un nicho de mercado en los sistemas de producción integrada Todavía más, creó controversias tanto por sus conceptos como por su enfoque mercadoiógico agresivo. De todas maneras, OPT/TOC se ha ganado un lugar entre los métodos más importantes para sistemas de producción integrada.

La figura 10-31 contiene una escala de tiempo que muestra la evolución de los métodos de PCP integrada y las filosofías administrativas. Las herramientas de PCP integrada dominaron la década de los 70, y la áe lo$ 80 fue la década de las filosoíias administrativas.

9 RESUMEN

En este capítulo se estudió la integración, un enfoque global para la planeación y control de la producción. La integración se usa para describir tanto, un concepto como una técnica, y se examinaron ambos aspectos en el dominio de laplaneacióa y control de la producción.

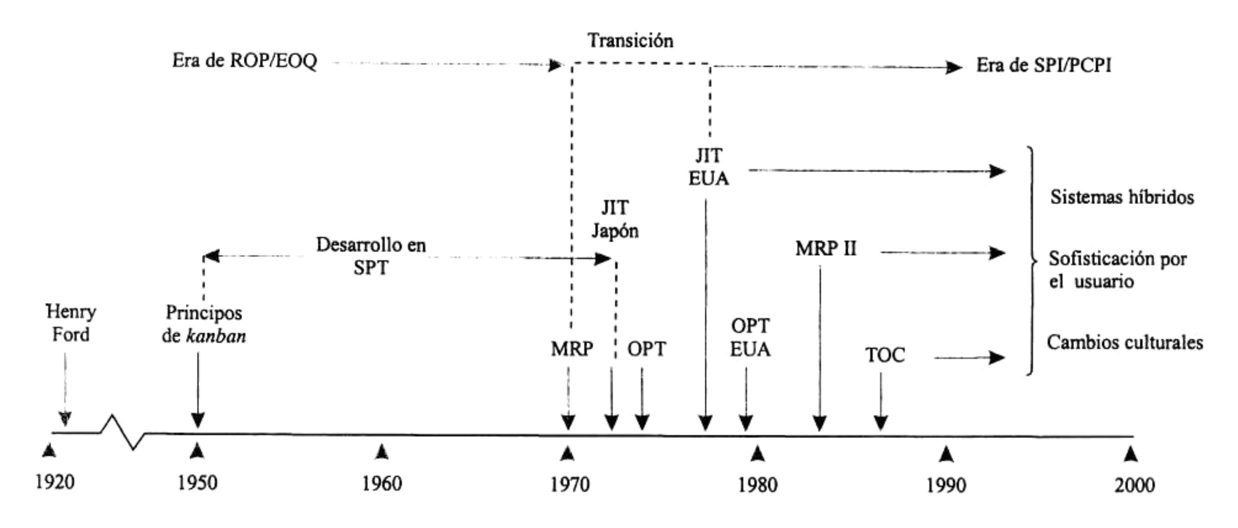


FIGURA 10-31
Evolución de la PCP integrada

Siglas:
ROP = punto de reorden
SPI = sistemas de producción integrados
PCPI = planeación y control de la producción integrados
SPT = sistema de producción Toyota

Se comenzó por examinar los aspectos relacionados con la integración. Primero se analizó la interacción de la función de producción con el resto de la organización, incluyendo el concepto de organización basada en el proceso, que surgió con los sistemas controlados por el mercado. Este análisis presentó también ejemplos reales de la función de producción dentro de una organización con varias plantas y localizaciones.

El siguiente aspecto relacionado con la integración es la arquitectura del control. Se vieron cuatro diseños básicos que comprenden modelos de toma de decisiones: centralizado, jerárquico apropiado, jerárquico modificado y jerárquico, y tres niveles de control: planta, célula y máquina.

El último aspecto en esta categoría es la integración entre plantas, dentro de la misma organización y con los proveedores y clientes, a través del uso de intercambio electrónico de datos.

La planeación y control de la producción tradicional no es más que una herramienta de producción. PCP integrada es mucho más que eso; es un concepto global que tiene una filosofía que lo controla y un conjunto de herramientas para implantarlo. Los tres enfoques principales para PCP integrada son los sistemas empujar, los sistemas jalar y los sistemas cuello de botella. Los tres sistemas tienen una componente técnica y un concepto administrativo que los apoya.

Los sistemas empujar se basan en la programación, con un concepto de administración central de la planeación. Los sistemas empujar se implantan mediante **MRP** II. **MRP** II se puede ver como un método para la planeación efectiva de todos los recursos de una organización. Es una ampliación de MRP, y tiene tres componentes primordiales: planeación de la alta administración, planeación de operaciones y ejecución de operaciones. MRP II, por naturaleza, es un sistema de información para manufactura en el que la integración está sumergida en su es-

tructura. Como tal, MRPII puede ser de gran ayuda para romper la barreras funcionales dentro de una organización. MRP II es un enfoque con amplio uso, con más de 200 paquetes de software disponibles.

Al principio, los sistemas jalar se definieron como sistemas de producción para fabricar el tipo de unidad necesaria en el momento requerido y en las cantidades adecuadas. Creció de una técnica de control de producción, *kanban*, a una filosofía de administración de la producción. Agrega a los proveedores y a los clientes al sistema de producción. Su alcance se expandió del control de flujo y material en proceso al control de flujo y la eliminación del desperdicio.

£1 concepto de jalar es la administración de las interdependencias recíprocas. Se analizaron los cuatro conceptos básicos de la filosofía JIT, lo que llevó a estudiar la mecánica de los sistemas *kanban.* Se mostró un análisis detallado del sistema de tarjetas duales, seguido de las cinco "reglas Monden" para implantar un sistema *kanban.* Se presentó un modelo para evaluar el número de *kanbans,* seguido del estudio del sistema de una tarjeta, cuya implantación más común es el cuadro *kanban.* Después se vieron los enfoques cuantitativos de modelado para los sistemas jalar, incluyendo los sistemas jalar de modelo mixto de secuenciación, el número de *kanbans* y el flujo de material basado en el tiempo. CONWIP es una variación de JIT de reciente surgimiento con algunos méritos interesantes. Para resaltar el estudio de CONWIP, se presentaron dos modelos, control CONWIP y evaluación del desempeño CONWIP. La reducción de preparaciones es un elemento clave en los sistemas jalar; se dedicó una sección a su importancia, los métodos para lograrla y un modelo económico para evaluarla.

La premisa que apoya los sistemas cuello de botella es que la producción en éstos son la base de la programación y planeación de la capacidad. La herramienta de programación es el software OPT. La filosofía administrativa es la teoría de restricciones (TOC), y su premisa básica es que la salida del sistema está determinada por sus restricciones. El objetivo fundamental de TOC es *la meta:* ganar dinero en el presente igual que en el futuro. Se definieron y analizaron las nueve reglas de OPT, seguidas de los cinco pasos de TOC.

OPT programa primero los cuellos de botella y desde ahí se programan las operaciones hacia atrás y hacia adelante. TAC es el mecanismo de retroalimentación-planeación y control que usa OPT para controlar el amortiguador de tiempo antes del cuello de botella. Se presentó un método para programar el cuello de botella.

Se ofreció un panorama del software OPT y algunas aplicaciones industriales junto con un análisis de la controversia surgida alrededor de TOC.

Después se hizo una comparación de los tres enfoques más importantes para PCP integrada. La conclusión es que comparten varias características. Ninguna de sus componentes técnicas es la mejor para todos los medios de producción y todos los problemas. Los sistemas híbridos, que combinan elementos de los tres sistemas, tienen el mayor potencial para aplicaciones futuras. Al estudiar la evolución de PCP integrada se observó que las herramientas dominaron los años 70 y la filosofía de administración los 80.

MINICASO: T & R ALARMS

T&R es un fabricante de sistemas de alarma de alta calidad. Una de las líneas de producción consiste en seis estaciones de trabajo en serie y opera bajo CONWIP. Los tiempos de ensamble (semiautomático, con media y desviación estándar en minutos) para un circuito integrado son:

Estación	1	2	3	4	5	6
Media	3	4	3	4	5	3
Desviación estándar	0.5	3	1	3	1	1

Suponga que la demanda es infinita, y que los tiempos de manejo de materiales son despreciables. Utilice simulación, cuando sea apropiado, para contestar las siguientes preguntas:

1. Identifique la estación cuello de botella. Establezca el número de tarjetas para esta línea. ¿Cuál sería la producción estimada?
2. ¿Cuál es la distribución del trabajo en proceso como una función del tiempo?
3. En CONWIP, el trabajo en proceso se acumula de manera natural antes del cuello de bote lla. ¿Cuántos cuellos de botella hay en esta situación?
4. Intente identificar una situación en la cual un cuello de botella tiene hambre. ¿Qué causa esta situación?
5. Utilice simulación para determinar la producción real de la línea. ¿Cuál es la causa de la diferencia entre su estimación y los resultados de la simulación?
6. Uno de los ingenieros sugiere una mejora al proceso que reducirá la variabilidad en las es taciones de trabajo 2 y 4 a 0.5. ¿Cuál es la distribución del trabajo en proceso antes de cada estación como función del tiempo? ¿Cuál es la producción de línea? Intente explicar la di ferencia.
7. ¿Es posible reducir el número de tarjetas y lograr la misma producción para esta línea? ¿Cuántas tarjetas se necesitarían?
8. Suponiendo que una unidad de trabajo en proceso cuesta $0.1 por día y que hay 300 días hábiles en un año, ¿cuál sería el ahorro anual obtenido con esta mejora?

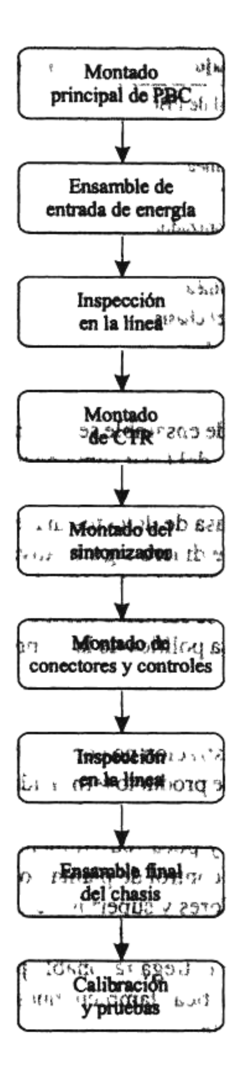
MINICASO: TVG MANUFACTURING

TVG es un pequeño fabricante de televisores de color. La compañía produce cerca de 300 televisores al día, en esencia, para el mercado doméstico. La familia de productos se caracteriza por varios tamaños de pantalla: 14", 16", 21", 26" y 29". Los principales departamentos de TVG son

Ensamble final, con cuatro líneas de ensamble con nueve estaciones de trabajo cada una.
Manufactura de subensambles, que compra las componentes grandes como cinescopios (CRT) a fuentes externas. Los subensambles primordiales son tarjetas PBC y chasis.
Almacenes, este departamento es responsable de las relaciones con los distribuidores, de la publicidad, etcétera.

- Diseño, que tiene a su cargo el diseño de nuevos modelos y las mejoras de las familias de productos existentes. La compañía no realiza investigación y usa sólo tecnología probada.

La estrategia de la compañía es vender televisores a precios competitivos. Estos televisores no ofrecen características de innovación y su diseño puede clasificarse como conservador. La estructura del ensamble final se ilustra en la siguiente figura:



Los televisores se transportan de uiiá estación dé ensamble a otra en plataformas especia les. Se usa una banda asincrona controlada por un operador (dividida en segmentos) como sis tema de manejo de materiales. Cuando una plataforma llega al final de la línea, se descarga el televisor y se lleva al almacén de productos terminados, la plataforma vacía se regresa al prin cipio de la línea. Una operación de ensamble en la prrrhera estación comienza sólo cuando hay una plataforma disponible. Hay lugar jpara cuatiro táfévisores eii'cadáestación de trabajo. Cuan do un aparato falla en una de las pruebas de inspección, iselíéva al área de retrabajo, donde los técnicos arreglan el problema y lo regresan a la línea^de ensamble. Los tiempos de operación para cada estación son los siguientes ;

Estación de trabajo	Tiempo (minutos)
Montado principal de PBC	4
Ensamble de entrada de energía	4
Inspección en la línea	5
Montado de CRT	6
Montado del sintonizador	3
Montado de conectores y controles	4
Inspección en la línea	3
Ensamble ñnal del chasis	4
Calibración y pruebas	5

Estos tiempos de ensamble se aplican a todos los modelos, excepto los de 21", 26" y 29" para los que el montado del CTR toma ocho minutos (el CTR es más pesado).

El año pasado surgieron algunos problemas. Los clientes se quejaban de una calidad muy baja y de una tasa de defectos inaceptable. La compañía garantiza los televisores y ha gastado una cantidad de dinero significativa para arreglar los apartados con problemas. El porcentaje de mercado de TVG bajó 1.5% el año pasado. Los distribuidores se quejaban de que sus órdenes no siempre se surtían a tiempo. Algunos de ellos ordenan unos cientos con dos semanas de anticipación. La política de la empresa es no tener inventarios, debido al alto costo de sus componentes.

Un analista dio forma a algunos otros síntomas de problemas:

- La administración no conoce el estado real de la planta. Saben cuántos televisores llegan al almacén de producto terminado y qué órdenes se liberaron para producción, pero no tienen idea de qué pasa en la planta.

  Existe muy poca retroalimentación del final de la línea de ensamble para el resto de la planta.

  El control de planta no está computarizado; es un proceso manual que realizan los coordinadores y supervisores.

  El tiempo de flujo de un conjunto varía considerablemente. Es muy difícil establecer un tiempo de entrega razonable para un lote de televisores.

  Las estadísticas también muestran que 10% de los televisores necesitan retrabajo durante el ensamble.

La administración estima que, a menos que se haga algo drástico, la compañía comenzará a perder dinero en los siguientes trimestres. Conteste las siguientes preguntas:

1. Clasifique los problemas descritos. Distinga claramente entre los síntomas y los proble mas.
2. ¿Qué aspectos de integración faltan? ¿Cuál debe ser el tipo de información de integración entre los departamentos dentro de la organización y la información de integración con los distribuidores y proveedores?
3. Intente definir la estrategia de control adecuada para este tipo de planta. Los elementos son la liberación de órdenes a producción (cuándo y en qué secuencia), la señal para el reabas tecimiento de amortiguadores de componentes, etcétera.
4. Sugiera una estrategia de mejoramiento de la calidad de los televisores terminados. Intente obtener una lista de verificación de qué buscar.

5. ¿Cuáles serían los requerimientos funcionales para un sistema de software de control de planta? Defina su interfase con el software de planeación de requerimientos de materiales.
6. Suponga que existe, en la compañía, una base de datos central de todas las operaciones, ór denes, inventarios, etc. Defina los requerimientos de información de cada departamento y de la administración. En otras palabras, ¿cuál sería el punto de vista de cada departamento sobre esta base de datos central?
7. Defina las medidas de desempeño para evaluar un proceso de mejoramiento.
8. Suponga que los tiempos de manejo de materiales son despreciables y que todos los apara tos pasan en la inspección en la linea.
   a) ¿Cuál es el número mínimo de plataformas necesario para la operación continua de es ta línea?
   b) ¿Cuál es la producción teórica de la línea para cada modo?
   c) ¿Cuál es el número máximo de plataformas?

10 REFERENCIAS

Adams, J., Balas, E. y Zawack, D., "The Shifting Bottleneck Procedure for Job Shop Scheduling", *Management Science,* 34, 391-401,1988.

Aggarwal, S. C, "MRP, JIT, OPT, FMS?", *Harvard Business Review,* 63, 8-16, septiembre-octubre, 1985.

Arogyaswamy, B. y Simmons R.P., "Thriving on Interdependence: The Key to JIT Implementation", *Production and Inventory Management Journal,* 32,56-60,1991.

Baudin, M., *Manufacturing Systems Analysis with Application to Production Scheduling,* Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1990.

Beckett, W. K. y Dang, K., "Synchronous Manufacturing, New Methods, New Mind Set", *Journal of Business Strategy,* 12,53-56, enero-febrero, 1992.

Bedworth, D. D., Henderson, M. P. y Wolfe, P. M., *Computer IntegratedDesign and Manufacturing,* The McGraw-Hill Companies, Inc., Nueva York, 1991.

Black J. T., *The Design ofa Factory with a Future,* The McGraw-Hill Companies, Inc., Nueva York, 1991.

Blackburn, J. D., *Time-Based Competition,* Business One Irwin, Homewood, IL, 1991.

Bookbinder, J. H. y Kotwa, T. R., "Modeling an AGV Automobile Body Framing System", *Intefaces,* 17, 41-50,1987.

Bolay, F., Waldraff, A. y White, A., "Manufacturing Plaraiing and Control Systems", *Electrical Communications,* 63,2,107-114,1989.

"Buyer's Guide", *HE Solutions,* julio, 1995, pp. 36-39.

Buzacott, J. A. y Shanthikumar, G. J., *Stochastic Models of Manufacturing Systems,* Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993.

Bylinsky, G., "An Efficiency Gurú with a Brown Box", *Fortune,* septiembre 5,120-132,1983.

Carlier, J., "The One Machine Sequcncing Problem", *European Journal ofOperations Research,* 11, 42-47,1982.

Chang, M. y Yih, Y., "Generic KANBAN Systems for Dyaamic Environments", *International Journal of Production Research,* 4,889-902,1994.

Cohén, O., "The Drum-Buffer-Rope (DBR) Approach to Logística", *Computer Aided Production Management,* A. Rolstadas, ed., Springer-Verlag, Nueva York, 1988.

Crawford, K. M., Blackstone, J. H. y Cox, J. F., "A Study of JIT Implementation and Operating Problems", *International Journal of Production Research,* 26,1561-1568> 1988.

Deschamps, J. P. y Nayak, P. R., *ProductJuggernaughts,* Harvard Business School Press, Boston, 1995.
"Dialogues", *Manufacturing Engineering,* mayo, 1987, p. 30.
Dilts, D. M., Boyd, N. R. y Whorms, H. H., "The Evolution of Control Architectures for Automated Manufacturing Systems", *Journal of Manufacturing Systetns,* 10,79-93,1991. Duenys, L, Hopp, W. J. y Spearman, M. L-, "Characterizing the Output Process of a CONWIP Line with Deterministic Processing and Random Outages", *Management Science,* 39, 975-988,1993. Erens, F. J. y Hegge, H. M. H., "Manufacturing and Sales Coordinaron for Product Variety", *International Journal ofProduction Economics,* 37, 83-99, 1994. Fogarty, D. W., Blackstone, J. H. y HotTman, T. R., *Production and Inventory Management,* South-Western, Cincinnati, OH, 1991.
Ford, H. y Oowther, S., *My Life and Work,* Heinemann, Londres, 1924.
Fry, D., Cox, F. y Blackstone J. H., "An Analysis and Discussion of the Optimized Production Technology Software and Its Use", *Production and Operations Management,* 1, 229-242,1992. Goldratt, E. M., "Computerized Shop Floor Scheduling", *InternationalJournal ofProduction Research,* 26,443-455,1988.
Goldratt, E. M. y Cox, J., *The Goal: Excellence in Manufacturing,* North River Press, Nueva York, 1984.
Goldratt, E. M. y Cox, J., *The Goal: A process ofOngoinglm^rovement,* North River Press, Nueva York, 1986.
Goldratt, E. M. y Fox, R. G., *The Race,* North River Press, Nueva York, 1986. Golhar, D. Y. y Stam, C L., "The Just in Time Philosophy: A Literature Review", *International Journal ofProduction Research,* 29, 657-676, 1991. Graves, S. C, Rinnooy Kan, A. H. G. y Zipkin* P. H., *Logistics ofProduction and Inventory,* Holanda, Amsterdam, 1993. Greenwood, N. R., *Implementing Flexible Manufacturing Systems,* John Wiley & Sons, Nueva York, 1988. Groover, M. FK, *Automation Production Systems and Computer Integrated Manufacturing,* Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1987. Hodgson, J. y Wang, D. "Óptima! Hybrid Push/Pull Control Sírategies for a Parallel Multistage System: Partí", *International Journal ofProduction Research, 29,*1279-42,1991. Hopp, W. J. y Spearman, M. L., "Throughput of a Constan! Work in Process Manufacturing Line Subject to Failures", *InternationalJournal ofProduction Research,* 29,635-655,1991. Inman, R. R. y Bulfm, R. L., "Sequencing JIT Mixed Model Assembly Lines", *Management Science,* 37, 901-904,1991.
Institute for Defense Analysis, Report R-338, diciembre, 1988. Jacobs, R. F., "OPT Uncovered: Many Production Plaflning and Scheduling Concepts Can Be Applied without the Software", *Industrial Engineering,* 32-41, octubre, 1984. Jasany, L. C, "Integrating the Enterprise", *Automation,* 38, 86-88, diciembre, 1991. Johnson, A., "Is Any System Letter Perfect?", *Management Review,* 85,22-27, septiembre, 1986. Karmarkar, U., "Getting Control of Just in Time", *Harvard BusineSs Review,* 67,122-131, septiembre-octubre, 1989. Kearns, D., "Xerox Satisfying Customer Needs With a New Culture", *Management Review,* 78, 61-63, 1989.
Kreisher, K., "MRPII -What it Means toYou", *Plástic Technology,* 68, julio, 1988. Krepchin, I. R., "How Software Must Change To Meet JIT Demand", *Modern Material Handling,* 43, 72-74, diciembre, 1988. Luebbe, R. y Finch, B., "Theory of Constraintsand Linear Programming: A Comparison", *International Journal of Production Reseatch,* 30,1471-1478,1992. Lundrigan, R., "What Is this Thmg Called OPT?", *Productwn and Inventory Management,* 27, segundo trimestre, 2-11,1986. *Manufacturing Engineering Software,* ICP Publications, Indianapolis, IN, 1990.

Meleton, M. P., "OPT -Fantasy OF Breakthrough?" *Production tmdlmentory Management,* 27, segundo trimestre, 13-21,1986,

Miller, R. K. y Walker, T. G, *FMS/CIM Systems Integration Handbook,* Fairman Press, Lilburn, GA,

Miltenburg, G. J., "Level Schedules for Mixed Model Assembly Lines in Just in Time Production Systems", *Management Science,* 35,192-207,1989.

Mitra, A., *Fundamentáis ofQuality Control and ImprovmenUMttmiXlw Nueva York, 1993.**

Monden, Y., "Adaptable Kanban Systems Helps Toyota Mamtain Just in Time Production", *Industrial Engineering,* 13, 5,28-46, 1981.

Monden, Y., *Toyota Production System,* Industrial Engineering and Management Press, Norcross, GA, 1993.

Morton, T. E. y Pentico, D. W., *Heuristic Scheduling Systems,* John Wiley & Sons, Nueva York, 1993.

Naj, A. M., "Manufacturing Gets a New Craze from Software: Speed", *Wall Street Journal,* agosto, 13, 1996. P.B4.

New, C, *Requirement Planning,* Halstead Press, Nueva York, 1973.

"News and Trends", *Modern Materials Handling,* abril, 1988, p. 7.

Orlicky, J., *Materials Requirements Planning: The New Way ofLife in Production and Inventory Management,* The McGraw-Hill Companies, Inc., Nueva York, 1975.

Plenert, G. y Best, T. D., "MRP, JIT and OPT: What's Best?" *Production and Inventory Management,* 27 segundo trimestre, 22-28,1986.

Plossl, G. W. y Wight, O. W., *Material Requirements Planning by Computer: A Special Report,* American Production and Inventory Control Society, Washington, DC, 1971.

Porteus, E. L., "Investing in Reduced Set-Up in the EOQ Model", *Management Science,* 31, 998-1010, 1985.

Quinlan, J. C, "How MRP II Revived the Raymond Corporation", *Tooling and Production,* 40,79,1989.

Reid, G, *WellMade in America: Lessonsfrom Harley Davidson Beingthe Best,* The McGraw Hill Companies, Inc., Nueva York, 1990.

Reiser, M. y Lavenberg, S., "Mean Valué Analysis of Closed Multichain Queueing Networks", *Journal ofthe Association ofComputing Machinery,* 27, 3313-322, 1980.

Riggs, J. L., *Production Systems: Planning, Analysis and Control,* John Wiley & Sons, Nueva York, 1987.

Roñen, B. y Starr, M. K., "Synchronized Manufacturing as in OPT: From Practice to Theory", *Computers in Industrial Engineering,* 18, 585-600, 1990.

Schoenberger. R. J., "Applications of Single Card and Dual Card Kanbans", *Interfaces,* 13, 4, 56-67, 1983.

Shingo, S., *Study of Toyota Production System from Industrial Engineering Viewpoint,* Productivity Press, Cambridge, MA, 1981.

Sohal, A. S. y Naylor, D., "Implementation of JIT in a Small Manufacturing Firm", *Production and Inventory Management Journal,* 33, primer trimestre, 20-25, 1992.

Spearman, M. L., "Customer Service in Pulí Production Systems", *Operations Research,* 40, 945-948, 1992.

Spearman, M. L., Woodruff, D. y Hopp, W. J., "CONWIP: A Pulí Alternative to Kanban", *International Journal of Production* Research, 28, 879-894, 1990.

Spearman, M. L. y Zanzanis, M. A., "Push and Pulí Production Systems: Issues and Comparison", *Operations Resarch,* 40, 521 -532, 1992.

Suzaki, K., *The New Manufacturing Challenge: Techniques for Continuous Improvement,* Collier Macmillan, Nueva York, 1987.

Tayur, "Properties of Serial KANBAN Systems", *Queueing Systems,* 12,297-318,1992.

"Technolohy Update," *Tooling and Production,* 40, 40, 1989.

Thompson, J. D., *Organizations in Action,* The McGraw Hill Companies, Inc., Nueva York, 1967.

Turbide, D. A., "MRPII - Still Number One", *HE Solutions,* julio, 1995, pp. 28-31.
Vollman, T. E., "OPT as an Enhancement to MRP II", *Production and Inventory Management,* 27, segundo trimestre, 38-47,1986.
Wallace, T. F., *MRPII: MakingltHappen,* Oliver Wight Limited Publications, Essex Junction, VT, 1990.
White, R. E., "An Empirical Assessment of JIT in U. S. Manufacturen", *Production and Inventory Management Journal,* 34, segundo trimestre, 38-42,1993.
Wight, O., *The Executives Guide to Successful MRP II,* Oliver Wight Limited Publications, Essex Junction, VT, 1984a
Wight, O., *ManufacturingResource Planning: MRPII,* Oliver Wight Limited Publications, Essex Junction, VT, 1984b.



Apéndice A

TABLA A-l
Área bajo la curva normal: O (2) = j

z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	.5000	.5040	.5080	.5120	.5160	.5199	.5239	.5279	.5319	.5359
0.1	.5398	.5438	.5478	.5517	.5557	.5596	.5636	.5675	.5714	.5753
0.2	.5793	.5832	.5871	.5910	.5948	.5987	.6026	.6064	.6103	.6141
0.3	.6179	.6217	.6255	.6293	.6331	.6368	.6406	.6443	.6480	.6517
0.4	.6554	.6591	.6628	.6664	.6700	.6736	.6772	.6808	.6844	.6879
0.5	.6915	.6950	.6985	.7019	.7054	.7088	.7123	.7157	.7190	.7224
0.6	.7257	.7291	.7324	.7357	.7389	.7422	.7454	.7486	.7517	.7549
0.7	.7580	.7611	.7642	.7673	.7704	.7734	.7764	.7794	.7823	.7852
0.8	.7881	.7910	.7939	.7967	.7995	.8023	.8051	.8079	.8106	.8133
0.9	.8159	.8186	.8212	.8238	.8264	.8289	.8315	.8340	.8365	.8389
1.0	.8413	.8438	.8461	.8485	.8508	.8531	.8554	.8577	.8599	.8621
1.1	.8643	.8665	.8686	.8708	.8729	.8749	.8770	.8790	.8810	.8830
1.2	.8849	.8869	.8888	.8907	.8925	.8944	.8962	.8980	.8997	.9015
1.3	.9032	.9049	.9066	.9082	.9099	.9115	.9131	.9147	.9162	.9177
1.4	.9192	.9207	.9222	.9236	.9251	.9265	.9279	.9292	.9306	.9319
1.5	.9332	.9345	.9357	.9370	.9382	.9394	.9406	.9418	.9429	.9441
1.6	.9452	.9463	.9474	.9484	.9495	.9505	.9515	.9525	.9535	.9545
1.7	.9&4	.9564	.9573	.9582	.9591	.9599	.9608	.9616	.9625	.9633
1.8	.9641	.9649	.9656	.9664	.9671	.9678	.9686	.9693	.9699	.9706
1.9	.9713	.9719	.9726	.9732	.9738	.9744	.9750	.9756	.9761	.9767
2.0	.9772	.9778	.9783	.9788	.9793	.9798	.9803	.9808	.9812	.9817
2.1	.9821	.9826	.9830	.9834	.9838	.9842	.9846	.9850	.9854	.9857
2.2	.9861	.9864	.9868	.9871	.9875	.9878	.9881	.9884	.9887	.9890
2.3	.9893	.9896	.9898	.9901	.9904	.9906	.9909	.9911	.9913	.9916
2.4	.9918	.9920	.9922	.9925	.9927	.9929	.9931	.9932	.9934	.9936
2.5	.9938	.9940	.9941	.9943	.9945	.9946	.9948	.9949	.9951	.9952
2.6	.9953	.9955	.9956	.9957	.9959	.9960	.9961	.9962	.9963	.9964
2.7	.9965	.9966	.99t>7	.9968	.9969	.9970	.9971	.9972	.9973	.9974
2.8	.9974	.9975	.9976	.9977	.9977	.9978	.9979	.9979	.9980	.9981
2.9	.9981	.9982	.9982	.9983	.9984	.9984	.9985	.9985	.9986	.9986
3.0	.9987	.9987	.9987	.9988	.9988	.9989	.9989	.9989	.9990	.9990

Recuerde:

$$\Phi(1-z) = 1-\Phi(z)$$

y $$\phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-(1/2)z^2}$$

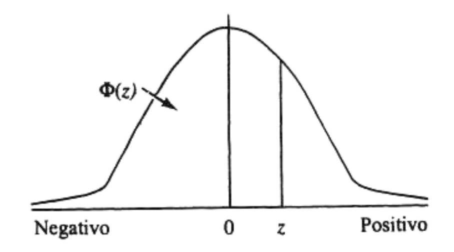


TABLA A-2
Integral de pérdida lineal normal unitaria: *L(z)* = J *(t-z) §(t)dt*

z	.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
0.0	.3989	.3940	.3890	.3841	.3793	.3744	.3697	.3649	.3602	.3556
0.1	.3509	.3464	.3418	.3373	.3328	.3284	.3240	.3197	.3154	.3111
0.2	.3069	.3027	.2986	.2944	.2904	.2863	.2824	.2784	.2745	.2706
0.3	.2668	.2630	.2592	.2555	.2518	.2481	.2445	.2409	.2374	.2339
0.4	.2304	.2270	.2236	.2203	.2169	.2137	.2104	.2072	.2040	.2009
0.5	.1978	.1947	.1917	.1887	.1857	.1828	.1799	.1771	.1742	.1714
0.6	.1687	.1659	.1633	.1606	.1580	.1554	.1528	.1503	.1478	.1453
0.7	.1429	.1405	.1381	.1358	.1334	.1312	.1289	.1267	.1245	.1223
0.8	.1202	.1181	.1160	.1140	.1120	.1100	.1080	.1061	.1042	.1023
0.9	.1004	.0986	.0968	.0950	.0933	.0916	.0899	.0882	.0865	.0849
1.0	..0833	.0817	.0802	.0787	.0772	.0757	.0742	.0728	.0714	.0700
1.1	.0686	.0673	.0659	.0646	.0634	.0621	.0609	.0596	.0584	.0573
1.2	.0561	.0550	.0538	.0527	.0517	.0506	.0495	.0485	.0475	.0465
1.3	.0455	.0446	.0436	.0427	.0418	.0409	.0400	.0392	.0383	.0375
1.4	.0367	.0359	.0351	.0343	.0336	.0328	.0321	.0314	.0307	.0300
1.5	.0293	.0286	.0280	.0274	.0267	.0261	.0255	.0249	.0244	.0238
1.6	.0232	.0227	.0222	.0216	.0211	.0206	.0201	.0197	[4].0192	.0187
1.7	.0183	.0178	.0174	.0170	.0166	.0162	.0158	.0154	.0150	.0146
1.8	.0143	.0139	.0136	.0132	.0129	.0126	.0123	.0119	.0116	.0113
1.9	.0111	.0108	.0105	.0102	.0100	.0097	.0094	.0092	.0090	.0087
2.0	.0085	.0083	.0080	.0078	.0076	.0074	.0072	.0070	.0068	.0066
2.1	.0065	.0063	.0061	.0060	.0058	.0056	.0055	.0053	.0052	.0050
2.2	.0049	.0047	.0046	.0045	.0044	.0042	.0041	.0040	.0039	.0038
2.3	.0037	.0036	.0035	.0034	.0033	.0032	.0031	.0030	.0029	.0028
2.4	.0027	.0026	.0026	.0025	.0024	.0023	.0023	.0022	.0021	.0021
2.5	.0020	.0019	.0019	.0018	.0018	.0017	.0017	.0016	.0016	.0015
2.6	.0015	.0014	.0014	.0013	.0013	.1012	.0012	.0012	.0011	.0011
2.7	.0011	.0010	.0010	.0010	.0009	.0009	.0009	.0008	.0008	.0008
2.8	.0008	.0007	.0007	.0007	.0007	.0006	.0006	.0006	.0006	.0006
2.9	.0005	.0005	.0005	.0005	.0005	.0005	.0004	.0004	.0004	.0004
3.0	.0004	.0004	.0004	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003

Recuerde:

$$\phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-(1/2)t^2}$$

$$\Phi(z) = \int_{-\infty}^{z} \phi(t)dt$$

$$L(-z) = L(z) + z$$

$$L(z) = z\Phi(z) + \phi(z) - z$$

índice

PLANEACIÓN Y CONTROL DE LA PRODUCCIÓN

La obra ofrece un panorama comprensible y actual de los sistemas de producción, núcleo dinámico de la manufactura y los servicios modernos. Con base en su experiencia como maestros, ingenieros en la práctica industrial y consultores, los autores proporcionan un enfoque aplicado a la planeación, el control y la integración de la producción en un entorno global cambiante. En cada área específica presentan ejemplos de situaciones, modelos, algoritmos de solución, tareas, minicasos, la evolución y los paquetes de computación aplicables.

Planeación y control de la producción presenta un enfoque flexible en cuanto a la profundidad de cada tema, convirtiéndolo en un recurso valioso para profesionales, alumnos y profesores. Los temas que cubre incluyen evolución de los sistemas de producción, solución de problemas, pronósticos, planeación agregada, inventarios, planeación de requerimientos de materiales, programación, administración de proyectos y planeación y control de la producción integrados.



McGraw-Hill Interamericana
Editores, S.A. de C.V.
A Subsidiary of The McGraw-Hill Companies